



**TUGAS AKHIR- TL 141584**

**PENGARUH VARIASI RESISTIVITAS DAN KADAR  
AIR TANAH TERHADAP ARUS PROTEKSI SISTEM  
*IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION*  
(ICCP) PADA PIPA API 5L *GRADE B* DENGAN  
VARIASI GORESAN LAPIS LINDUNG**

ARINI SANTOSO  
NRP. 2711 100 029

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015

*(Halaman ini sengaja di kosongkan)*



**FINAL PROJECT- TL 141584**

***THE EFFECT OF VARIATIONS IN RESISTIVITY  
AND SOIL WATER CONTENT TOWARDS CURRENT  
PROTECTION SYSTEM IMPRESSED CURRENT  
CATHODIC PROTECTION (ICCP) AT API 5L GRADE  
B PIPE WITH THE SCRATCH COATING VARIATION***

ARINI SANTOSO  
NRP. 2711 100 029

Advisor  
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  
Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc

MATERIAL AND METALLURGICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

*(Halaman ini sengaja di kosongkan)*

**PENGARUH VARIASI RESISTIVITAS DAN KADAR AIR  
TANAH TERHADAP ARUS PROTEKSI SISTEM  
*IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION (ICCP)*  
PADA PIPA API 5L GRADE B DENGAN VARIASI GORESAN  
LAPIS LINDUNG**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Korosi Dan Analisa Kegagalan  
Program Studi SI Jurusan Teknik Material Dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

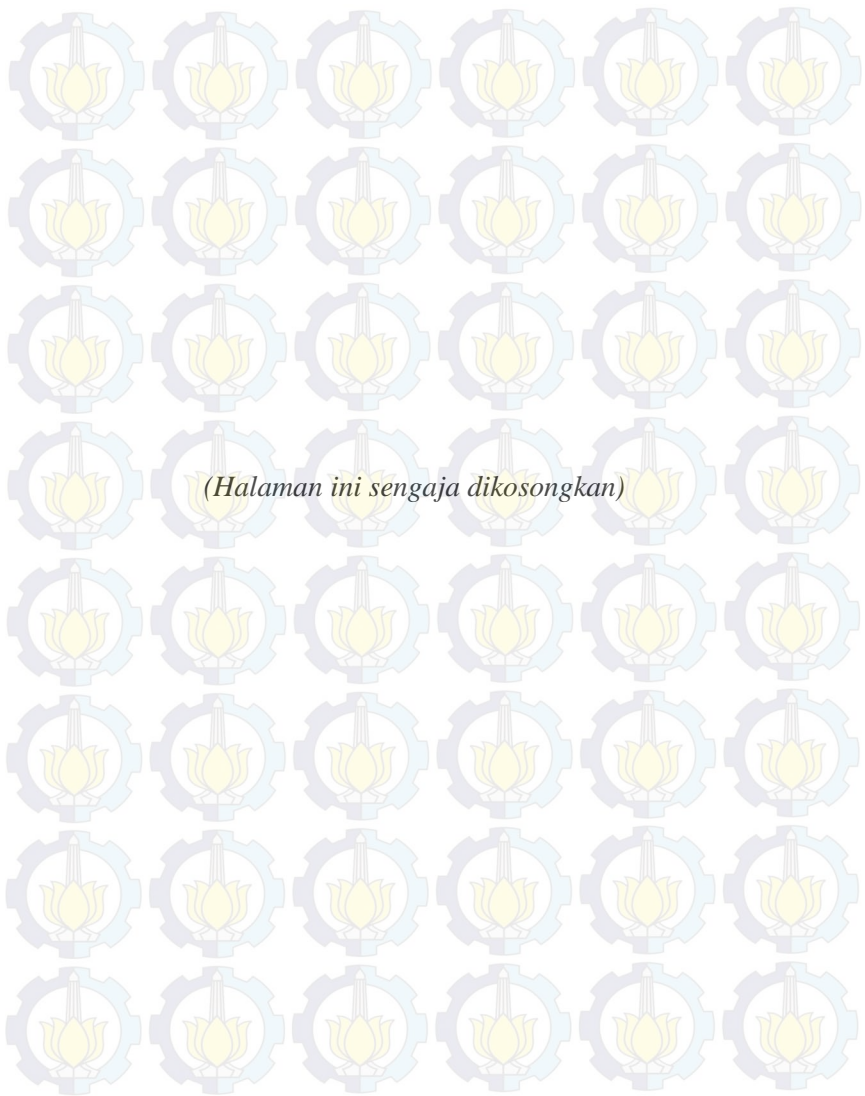
Oleh :

Arini Santoso  
NRP. 2711 100 029

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA ..... (Pembimbing I)
2. Tubagus Noor R. S.T., M.Sc ..... (Pembimbing II)





**PENGARUH VARIASI RESISTIVITAS DAN KADAR AIR  
TANAH TERHADAP ARUS PROTEKSI SISTEM *IMPRESSED  
CURRENT CATHODIC PROTECTION* (ICCP) PADA PIPA API  
5L GRADE B DENGAN VARIASI GORESAN LAPIS LINDUNG**

**Nama Mahasiswa** : Arini Santoso  
**NRP** : 2711100029  
**Jurusan** : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : 1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  
2. Tubagus Noor R, S.T., M.Sc.

**Abstrak**

Metode yang sering kali digunakan untuk mengurangi korosi pada pipa bawah tanah adalah pemberian lapis lindung dan instalasi ICCP. Faktor lingkungan yang menjadi salah satu indikator utama terhadap korosi pada tanah adalah resistivitas dan kadar air tanah. Tujuan penelitian, untuk menganalisa pengaruh resistivitas dan kadar air tanah terhadap kebutuhan arus proteksi sistem ICCP pada material pipa API 5L Grade B sebagai katoda yang yang diberi variasi *coating* (*coating* seluruhnya, tanpa *coating* dan cacat gores berbentuk persegi dengan luas 500 mm<sup>2</sup>). Variasi kadar air 0% (kondisi kering) dan 25%. Anoda menggunakan grafit, *rectifiernya* sebagai penyearah arus dan elektroda referensi Cu/CuSO<sub>4</sub> sebagai elektroda acuan. Pengukuran arus proteksi ini dilakukan selama 7 hari dengan pengambilan data setiap hari. Dari hasil penelitian terlihat bahwa dengan bertambahnya kadar air dalam tanah akan menyebabkan nilai resistivitas tanah akan menurun, karena bertambahnya jumlah air dalam tanah akan mempermudah aliran arus. Nilai resistivitas tanah yang semakin tinggi akan membutuhkan arus proteksi yang rendah, dikarenakan pada tanah dengan nilai resistivitas tinggi memiliki tahanan yang tinggi (lemah menghantar listrik atau bersifat isolator). Sedangkan dengan kadar air tanah yang tinggi nilai arus proteksi semakin meningkat, karena air mempermudah ionisasi elektron dalam tanah, sehingga mempermudah aliran arus.

**Kata Kunci** : Resistivitas Tanah, Kadar Air Tanah, Goresan Lapis Lindung, Pipa API 5L Grade B, Arus Proteksi dan ICCP



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



***THE EFFECT OF VARIATIONS IN RESISTIVITY AND SOIL  
WATER CONTENT TOWARDS CURRENT PROTECTION  
SYSTEM IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION  
(ICCP) AT API 5L GRADE B PIPE WITH THE SCRATCH  
COATING VARIATION***

***Name*** : Arini Santoso  
***Student Number*** : 2711100029  
***Major*** : Materials and Metallurgical Engineering FTI-ITS  
***Advisor*** : 1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  
2. Tubagus Noor R, S.T., M.Sc.

***Abstract***

*The frequent method that been used for reducing corotion in underground pipe by giving coat and ICCP installation. The environment factor become the most indicator towards ground corotion is the resistivity and soil water content. The purpose of this research are to analyze the resistivity effect and soil water content towards the requirement of ICCP current protection system at pipe material API 5L Grade B as a chatode that been add with the coating variation (full coating, without coating and square form scratch defect with 500 mm<sup>2</sup> wide). The 0% of water content variation (dry condition) and 25%. We use graphite as an anode and current rectifier and Cu/CuSO<sub>4</sub> electrode as a reference. The measurement of this current protection been held for 7 days with data retrieval everyday. From this research it show us that the increase of soil water content level make the soil resistivity reduce, because the increasing of the water level in the soil can ease the current. The soil resistivity number can be higher but it needs the low current protection, this is all due to the soil with the higher resistivity have the high resistance (too weak to deliver the electric current or isolator).Meanwhile with the high level of soil water content, the number of the current protection will be increase, this is all due to the water can easily absorb the ionisation of the electron in the soil so it can ease the current flow.*

***Keywords*** : Soil Resistivity, Soil Water Content, Scratch Coating, Pipe API 5L Grade B, Protection Current, ICCP



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir dengan judul :

**“Pengaruh Variasi Resistivitas dan Kadar Air Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) Pada Pipa API 5L Grade B Dengan Variasi Goresan Lapis Lindung”**

Penyusunan laporan ini merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk menyelesaikan pendidikan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa selama proses penyusunan tugas akhir ini telah melibatkan banyak pihak yang sangat membantu. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, saudara dan keluarga yang senantiasa mendukung, membimbing, serta memberikan nasihat dan doa demi kebaikan penulis selama ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA dan Bapak Tubagus Noor Rohmannudin S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan motivasi selama pelaksanaan Tugas Akhir.
3. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro ,ST.MT. selaku ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Seluruh dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah mendidik, memberi ilmu dan bimbingan selama perkuliahan.
5. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah banyak membantu.
6. Mas Dafiq selaku laboran di Lab. Korosi dan Kegagalan Material, teman-teman seperjuangan TA di lab. Korosi atas

bantuan, kerjasama dan sarannya selama pengerjaan Tugas Akhir, serta teman-teman MT 13 yang setia menemani, mendukung dan memotivasi selama ini.

7. Keluarga besar UKM Bola Basket ITS yang selalu memberikan semangat dan motivasi selama pelaksanaan dan penyelesaian laporan tugas akhir ini.

8. Semua pihak yang telah membantu yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari adanya keterbatasan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Besar harapan penulis akan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga penulisan ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Juli 2015  
Penulis

Arini Santoso



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Teori Dasar Korosi .....	7
2.2 Jenis Material Pipa .....	8
2.3 Lapis Lindung ( <i>Coating</i> ) .....	11
2.3.1 Lapisan Organik dengan Cat .....	13
2.3.2 Jenis Lapis Lindung ( <i>Coating</i> ) .....	15
2.3.3 Kerusakan dan Kegagalan <i>Coating</i> .....	18
2.4 Proteksi Katodik.....	19
2.4.1 Proteksi Katodik Arus Paksa ( <i>Impressed Current</i> <i>Cathodic Protection</i> ) .....	23
2.5 Potensial Korosi .....	25
2.6 <i>Elektrode Reference</i> .....	26
2.7 Anoda Grafit.....	30
2.8 Korosi Baja Karbon di Dalam Tanah .....	32

2.8.1 Resistivitas Tanah .....	32
2.8.2 Kelembaban Tanah .....	34
2.8.3 Tekstur dan Struktur Tanah.....	35
2.8.4 Keasaman (pH) .....	36
2.8.5 Kelarutan Garam.....	37
2.8.6 Aerasi (Kandungan Oksigen).....	38
2.8.7 Kadar Sulfat .....	39
2.8.8 Kadar Klorida .....	39
2.8.9 Aktivitas Mikroba .....	40
2.9 Uji Resistivitas Tanah .....	40
2.10 Acuan Penelitian .....	42
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>45</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	45
3.2 Standard yang Digunakan.....	46
3.3 Bahan Penelitian.....	46
3.4 Alat Penelitian .....	46
3.5 Prosedur Penelitian.....	47
3.5.1 Preparasi Spesimen (Katoda) .....	47
3.5.2 Preparasi Anoda.....	49
3.5.3 Preparasi Media Elektrolit .....	49
3.5.3.1 Kadar Air.....	49
3.5.3.2 Menghitung Nilai Resistivitas Tanah .....	50
3.5.4 Pengkondisian Spesimen .....	51
3.5.5 Pembuatan Rangkaian ICCP .....	52
3.6 Pengukuran Arus Proteksi .....	52
3.7 Rancangan Penelitian .....	53
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>57</b>
4.1 Analisa Data .....	57

4.1.1 Pengukuran Nilai Resistivitas dengan Variasi Kadar Air .....	57
4.1.2 Pengukuran Potensial Awal Pipa API 5 L <i>Grade B</i> .....	58
4.1.3 Pengukuran Arus Proteksi.....	61
4.1.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi Berdasarkan Luas Goresan Lapis Lindung Pada Pipa.....	63
4.1.4.1 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan dengan Kadar Air Tanah 0% .....	63
4.1.4.2 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm <sup>2</sup> dengan Kadar Air Tanah 0% .....	64
4.1.4.3 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa <i>Coating</i> dengan Kadar Air Tanah 0% .....	65
4.1.4.4 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan dengan Kadar Air Tanah 25% .....	67
4.1.4.5 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm <sup>2</sup> dengan Kadar Air Tanah 25% .....	68
4.1.4.6 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa <i>Coating</i> dengan Kadar Air Tanah 25% .....	69
4.1.5 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi Terhadap Resistivitas dan Kadar Air Tanah .....	70
4.1.5.1 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Kadar Air Tanah 0% pada Hari ke 7.....	70
4.1.5.2 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Kadar Air Tanah 25% pada Hari ke 7 .....	72
4.1.6 Hasil Foto Makro Spesimen.....	74

4.1.6.1 Kadar Air Tanah 0% .....	74
4.1.6.2 Kadar Air Tanah 25% .....	77
4.2 Pembahasan .....	79
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>87</b>
5.1 Kesimpulan .....	87
5.2 Saran .....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>89</b>
<b>LAMPIRAN A .....</b>	<b>93</b>
<b>LAMPIRAN B .....</b>	<b>103</b>
<b>LAMPIRAN C .....</b>	<b>109</b>
<b>LAMPIRAN D .....</b>	<b>113</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>xxi</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skematik Proteksi Katodik (a) <i>Sacrificial Anodes</i> (b) <i>Impressed Current</i> .....	21
Gambar 2.2 Rangkaian Sistem ICCP.....	24
Gambar 2.3 Elektrode Standard Cu/CuSO <sub>4</sub> .....	28
Gamabr 2.4 Konfigurasi Wenner.....	41
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	45
Gambar 3.2 Spesimen Katoda .....	47
Gambar 3.3 Ilustrasi Gambar Spesimen Katoda dengan Luas Goresan (a) 0 mm <sup>2</sup> ( <i>Full Coating</i> ), (b) 500 mm <sup>2</sup> , dan (c) Tanpa <i>Coating</i> .....	47
Gambar 3.4 Preparasi Anoda.....	49
Gambar 3.5 Skema Pengukuran untuk Resistivitas Tanah .....	51
Gambar 3.6 Skema Rancangan Sistem ICCP .....	52
Gambar 4.1 Grafik Potensial Awal dalam Media Tanah dengan Kadar Air 0% (A = <i>Full Coating</i> , B = Luas Goresan 500 mm <sup>2</sup> , dan C = Tanpa <i>Coating</i> ).....	60
Gambar 4.2 Grafik Potensial Awal dalam Media Tanah dengan Kadar Air 25% (A = <i>Full Coating</i> , B = Luas Goresan 500 mm <sup>2</sup> , dan C = Tanpa <i>Coating</i> ).61	
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan pada Kadar Air Tanah 0% .....	63
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm <sup>2</sup> pada Kadar Air Tanah 0% .....	64
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa <i>Coating</i> pada Kadar Air Tanah 0% .....	65
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan pada Kadar Air Tanah 25% .....	67

Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm <sup>2</sup> pada Kadar Air Tanah 25% .....	68
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa <i>Coating</i> pada Kadar Air Tanah 25% .....	69
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Kadar Air Tanah 0% .....	71
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Kadar Air Tanah 25% .....	73
Gambar 4.11 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 1209.32 Ohm.m .....	74
Gambar 4.12 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 1744.47 Ohm.m .....	75
Gambar 4.13 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 2985.04 Ohm.m .....	75
Gambar 4.14 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 6165.39 Ohm.m .....	76
Gambar 4.15 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 8040.91 Ohm.m .....	76
Gambar 4.16 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 82.46 Ohm.m .....	77
Gambar 4.17 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 92.36 Ohm.m .....	77
Gambar 4.18 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 97.81 Ohm.m .....	78
Gambar 4.19 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 123.69 Ohm.m .....	78
Gambar 4.20 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 326.44 Ohm.m .....	79

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Pipa API 5L <i>Grade B</i> .....	10
Tabel 2.2 Material dan Spesifikasi Pipa API 5L .....	11
Tabel 2.3 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Metode <i>Coating</i> untuk Proteksi Katodik .....	13
Tabel 2.4 Kecepatan Tembus Uap Air untuk Berbagai Ukuran Lubang .....	15
Tabel 2.5 Kecepatan Tembus Cairan Air.....	15
Tabel 2.6 Beberapa Jenis Kerusakan yang Terjadi pada <i>Coating</i> .....	18
Tabel 2.7 Jenis Elektrode Pembanding, Besar Potensial Terhadap Standar Hidrogen dan Aplikasi .....	25
Tabel 2.8 Beberapa Anoda yang Digunakan pada Sistem ICCP .....	31
Tabel 2.9 Laju Konsumsi Anoda Grafit .....	31
Tabel 2.10 Pengaruh Resistivitas Tanah Terhadap Laju Korositas .....	33
Tabel 2.11 Nilai Resistivitas Tanah.....	34
Tabel 2.12 Acuan Penelitian.....	42
Tabel 3.1 Rencana Pengukuran Arus dan Potensial untuk Pengukuran Resistivitas Tanah.....	54
Tabel 3.2 Rencana Pengukuran Arus Proteksi.....	55
Tabel 4.1 Nilai Resistivitas dengan Variasi Kadar Air .....	57
Tabel 4.2 Kondisi Awal Setelah Imersi Pipa dalam Media Tanah Tanpa Instalasi ICCP selama 7 Hari untuk Variasi Kadar Air 0% .....	59
Tabel 4.3 Kondisi Awal Setelah Imersi Pipa dalam Media Tanah Tanpa Instalasi ICCP selama 7 Hari untuk Variasi Kadar Air 25% .....	59







## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Di Indonesia memiliki beberapa sektor yang berkontribusi terhadap pemasukan negara, salah satunya pada sektor minyak dan gas (migas). Pada industri tersebut terdapat jaringan pipa di bawah tanah yang harus sangat diperhatikan, karena memiliki peranan yang penting dalam proses produksi dan distribusinya. Industri ini memiliki sifat yang sangat korosif. Tanpa disadari bahwa permasalahan korosi ini dapat menyebabkan dampak-dampak yang merugikan baik dari segi ekonomi, sumber daya alam dan juga sumber daya manusia.

Korosi adalah degradasi dari material yang diakibatkan oleh reaksi kimia dengan material lainnya dan lingkungan (Jones. Deny, 1992). Hal ini dapat didefinisikan sebagai kerusakan atau degradasi logam akibat reaksi redoks antara suatu logam dengan berbagai zat di lingkungannya yang menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak di kehendaki dan sebagai hasil kerusakan dari reaksi kimia antara logam atau logam paduan dengan lingkungannya. Korosi dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan proses sehingga mengganggu jalannya proses (Sulistijono, 1999). Korosi merupakan salah satu penyebab utama tidak mencapai atau berkurangnya umur pakai yang ditentukan oleh desain (umumnya 10 hingga 40 tahun). Namun, sering kali desain yang telah direncanakan tidak sesuai dengan realita yang ada. Sering kali umur pakai pipa tidak dapat mencapai umur yang telah didesain. Oleh karena itu, maka banyak faktor dan juga pertimbangan-pertimbangan yang harus diperhatikan dalam perancangan jaringan pipa tersebut, supaya dihasilkan rancangan

---



yang dapat memiliki umur pakai lama dan yang sesuai dengan standar yang telah ada.

Dalam industri minyak dan gas salah satu penyebab kerusakan terbesar adalah korosi. Adanya aliran fluida dan faktor lingkungan yang bersifat korosi dapat mengancam desain yang telah dirancang. Oleh karena itu sangatlah penting melakukan perlindungan supaya jaringan pipa tersebut memiliki umur pakai yang lebih lama dan sesuai standar, dimulai dari pemilihan material hingga instalasi pada pipa tersebut. Material yang biasanya digunakan adalah baja karbon rendah, sehingga sering kali terjadi *internal corrosion* karena terkandung banyak senyawa oksigen, asam sulfida, karbon monoksida, *sulphate reducing area* (Roberge, 2000). Pipa API 5L Grade B merupakan salah satu material yang biasa digunakan pada minyak dan gas, berdasarkan standar dari *American Petroleum Institute*. Komposisi yang dimiliki oleh pipa API 5L Grade B ini terdiri dari karbon, magnesium, mangan, fosfor, sulfur, dan besi. Paduan yang ditambahkan ini terkadang tidak cukup kuat menahan korosi yang terjadi sehingga pipa tersebut akan mengalami berbagai kondisi dilingkungan tanah (ASM International, 2003).

Selain faktor fluida tersebut yang merupakan korosi internal pada pipa, tetapi korosi eksternal pipa karena kondisi lingkungan tanah yang ekstrem juga semakin menambah kecenderungan terjadi korosi yang semakin parah. Korosi pada tanah merupakan hal yang penting, terutama untuk struktur yang terpendam dalam waktu yang lama. Korosi pada tanah merupakan fenomena yang kompleks dengan berbagai variabel yang saling terkait. Variasi sifat fisik dan karakteristik tanah merupakan faktor utama penyebab korosi pada struktur yang terpendam. Resistivitas tanah merupakan indikator utama terhadap korosi, serta faktor lainnya yang berpengaruh adalah kelembaban tanah (kadar air dalam



tanah). Dimana kedua faktor tersebut sangatlah berpengaruh terhadap laju korosi di tanah. dengan adanya kadar air yang berbeda yang diakibatkan oleh faktor iklim (semisal curah hujan) akan dapat mengubah nilai resistivitas tanah tersebut dan menyebabkan laju korosi semakin cepat dengan bertambahnya kadar air dalam tanah. Sehingga dengan adanya faktor tersebut perlu adanya perlindungan terhadap korosi pada pipa dibawah tanah dengan cara pelapisan (*coating*) yang menjadi kewajiban untuk dilakukan dalam menanggulangnya, merupakan salah satu cara yang efektif untuk mencegah terjadinya korosi yang berinteraksi dengan lingkungan karena terhalang oleh adanya lapisan *coating*. Akan tetapi, kemungkinan terjadinya kerusakan pada *coating* tetap selalu ada. Meskipun pipa tersebut diberi *coating* tidaklah menjamin akan terbebas dari serangan korosi, sehingga dibutuhkan cara lain yang dapat digunakan untuk menanggulangi korosi. Banyak cara yang dapat dilakukan untuk menanggulangi terjadinya korosi, yaitu seperti dijelaskan sebelumnya dimulai dari pemilihan material pipa yang memiliki ketahanan korosi tinggi yaitu pipa API 5L Grade B, kemudian diberi *coating*. Namun cara lain yang biasa digunakan untuk melindungi jaringan pipa tersebut dengan menggunakan proteksi katodik. Metode pencegahan korosi yang biasa digunakan adalah sistem *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP).

Sistem ICCP digunakan untuk melindungi struktur baik yang di-*coating* maupun tidak di-*coating*. Tingkat fleksibilitas dari sistem ini juga cukup baik karena dapat didesain dengan rentang kapasitas *output* arus yang luas. Kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan *output* sesuai dengan kebutuhan. Tingkat fleksibilitas tinggi tersebut dapat menentukan kebutuhan arus proteksi dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan korosi pada jaringan pipa





baik yang memiliki *coating* yang bagus ataupun dalam kondisi yang rusak. Hal inilah yang melatar belakangi penulis melakukan penelitian dengan menggunakan metode ICCP pada lingkungan tanah dengan kondisi nilai resistivitas dan kadar air yang dimiliki berbeda untuk struktur pipa dengan kondisi *coating* yang rusak atau cacat menggunakan anoda grafit.

## 1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang diteliti dalam tugas akhir ini yaitu : bagaimana pengaruh resistivitas dan kadar air terhadap arus proteksi pada sistem ICCP pipa API 5L *Grade B*.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah menganalisa pengaruh resistivitas dan kadar air terhadap arus proteksi pada sistem ICCP pipa API 5L *Grade B*.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Material yang digunakan yaitu baja karbon rendah (API 5L *Grade B*) adalah homogen.
2. Lapis lindung yang digunakan menutup permukaan spesimen sudah sempurna, selain goresan yang disengaja dibuat.
3. Ukuran partikel tanah dianggap homogen.

## 1.5 Manfaat penelitian

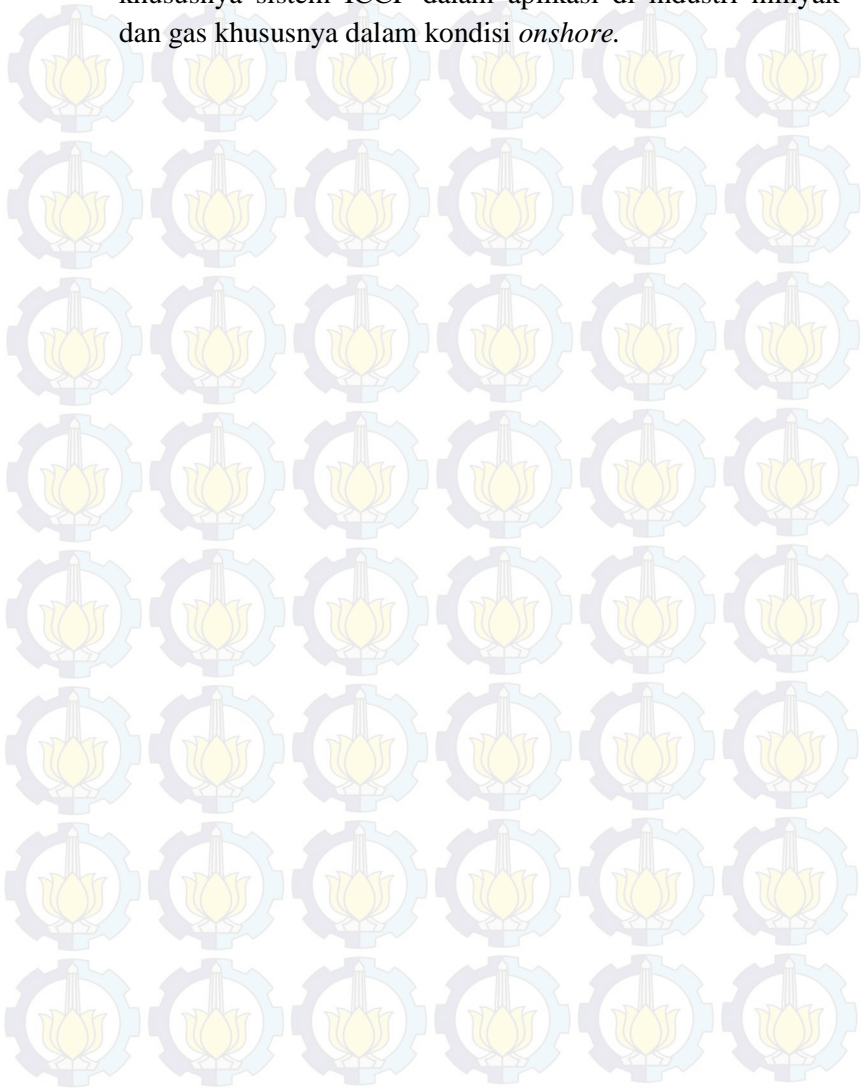
Manfaat dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Sebagai referensi dalam menentukan arus proteksi yang harus diberikan pada *pipeline* agar kondisinya sesuai dengan keadaan lapis lindung (*coating*) yang memiliki goresan.





- 
2. Untuk mengembangkan keilmuan mengenai proteksi katodik khususnya sistem ICCP dalam aplikasi di industri minyak dan gas khususnya dalam kondisi *onshore*.





*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB II

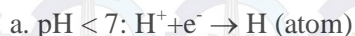
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Teori Dasar Korosi

Korosi merupakan penurunan kualitas (*degradation*) suatu material akibat reaksi dengan lingkungannya. Proses korosi pada suatu logam dalam lingkungan elektrolit adalah suatu proses elektrokimia yang terjadi transfer elektron dari jenis material satu ke yang lain. Korosi didefinisikan sebagai serangan yang merusak dan tidak disengaja pada suatu logam, yang mana adalah reaksi elektrokimia dan biasanya dimulai dari permukaan. (Callister, 2006). Proses ini terjadi bila ada reaksi setengah sel yang melepaskan elektron (reaksi oksidasi pada anoda) dan menerima elektron (reaksi reduksi pada katoda), akan terus berlangsung sampai terjadi kesetimbangan dinamis dimana jumlah elektron yang dilepas sama dengan yang diterima. Korosi dapat terjadi jika 4 syarat dibawah ini terpenuhi:

##### 1. Katoda

Merupakan tempat terjadinya reaksi reduksi dimana ion positif berkumpul dan biasanya tidak terjadi korosi, walaupun demikian mungkin terjadi kerusakan dalam kondisi tertentu. Reaksi reduksi yang mungkin terjadi pada katoda, dinyatakan pada persamaan reaksi setengah sel, di bawah ini :



##### 2. Anoda

Merupakan tempat terjadinya reaksi oksidasi dimana ion negatif berkumpul dan biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron dari atom-atom logam netral untuk membentuk ion-

---



ion yang mungkin tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk produk korosi yang tidak larut. Reaksi ini bisa menghalangi pelarutan logam lebih lanjut yang disebut pemasifan (*passivasi*) dimana reaksi korosi berhenti. Reaksi oksidasi logam M biasanya dinyatakan dalam persamaan :



Dengan banyak electron yang diambil dari masing-masing atom yang ditentukan oleh valensi logam yang bersangkutan. Umumnya  $z = 1, 2$ , atau  $3$ .

3. Elektrolit sebagai media korosi, penghantar elektron antara katoda dan anoda (*conductive electrolyte*)
4. Kontak metalik sebagai penghubung anoda dan katoda (*electrically connecting*)

## 2.2 Jenis Material Pipa

Pemilihan material menggunakan logam sudah diterapkan secara umum sejak tahun 1950-an berdasarkan standard API kode 5L tentang pemilihan material pipa. Pada akhir 1980-an berdasarkan kode API pula, terdapat beberapa macam tipe material pipa, yaitu A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X64, X70 dan X80. Setiap tipe material mempunyai karakteristik zat dan material penyusun masing-masing. Spesifikasi material baja yang digunakan tergantung pada komposisi kimiawi, kekuatan material, dan toleransi pipa dalam industri dan manufaktur.

Material yang sering digunakan dalam dunia industri, migas dan manufaktur terdiri dari dua jenis, yaitu:

### 1. *Carbon Steel*

Jenis ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan, spesifikasinya banyak ditemukan dalam *American Society of Mechanical Engineering* (ASTM) dan





*American Society of Mechanical Engineering (ASME).*

Terdapat 3 jenis pipa yang sering digunakan, yaitu:

- a. ASTM A106, material yang penggunaannya tergantung *grade Tensile Strength*nya yaitu: *Grade A* (48 ksi), *Grade B* (60 ksi) dan *Grade C* (70 ksi).
- b. ASTM A53, material pipa yang dilapisi oleh *zinc (galvanized)* merupakan alternative dari penggunaan ASSTM A106.
- c. ASTM A333, material yang biasa digunakan pada fluida yang memiliki temperatur rendah (mulai dari - 50°F).

## 2. *Stainless Steel*

Material pipa ini dinamakan *austenitic stainless steel*. Namun secara umum biasanya disebut *stainless steel*. *Stainless steel* yang biasa digunakan adalah tipe 304L. Sesuai kode L dibelakang nama 304L, tipe ini mengandung cukup sedikit campuran karbon daripada tipe 304, tetapi memiliki kekuatan yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi yang cukup baik.

Pada dunia industri yang sebenarnya, ada dua jenis pipa *stainless steel* yang paling sering dipakai, yaitu:

1. ASTM A312, untuk pipa berukuran dibawah 8 inci.
2. ASTM A358, untuk pipa berukuran diatas 8 inci.

Dalam penelitian ini, material pipa yang digunakan adalah baja karbon rendah API 5 L *grade B*. Spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Tabel 2. 1 Komposisi Kimia Pipa API 5 L Grade B  
(Sumber: *Specification for Line Pipe API 5L Standard 43<sup>rd</sup> Edition*)

Elemen	Kadar (%)
Carbon	0.22
Mangan	1.2
Phospor	0.025
Sulfur	0.015
Titanium	0.04

Pipa API 5 L banyak digunakan dalam industri minyak dan gas baik *onshore* maupun *offshore*. Maksud dari API 5 L Grade B adalah:

API : *American Petroleum Institute*

5 : Seri yang digunakan untuk *Tubular Goods (ex: Casing, Tubing, Pipeline)*

L : Line Pipe

B : Grade yang berhubungan dengan sifat mekanik material dan komposisi kimianya

Material dan spesifikasi dari Pipa API 5 L menurut *API Specification for Line Pipe 43<sup>rd</sup> Edition, table 2 and 3* dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini:



**Tabel 2. 2 Material dan Spesifikasi Pipa API 5 L**

Standard Specification	Chemical Composition (%)					Mechanical Strength	
	Grade	C	Mn	P	S	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )
		max	max	max	max		
API 5L	A25	0.21	0.6	0.03	0.03	172	310
	A25	0.21	0.6	0.08	0.03	210	335
	B	0.28	1.2	0.03	0.03	241	414
	X42	0.28	1.3	0.03	0.03	290	414
	X46	0.28	1.4	0.03	0.03	317	434
	X52	0.28	1.4	0.03	0.03	359	455
	X56	0.28	1.4	0.03	0.03	386	490
	X60	0.28	1.4	0.03	0.03	414	517
	X65	0.28	1.4	0.03	0.03	448	531
	X70	0.28	1.65	0.03	0.03	483	565

### 2.3 Lapis Lindung (*Coating*)

Lapis lindung (*coating*) merupakan metoda utama yang paling banyak digunakan untuk mengontrol korosi. *Coating* ini digunakan untuk memberikan perlindungan jangka panjang di bawah berbagai kondisi korosi dan sebagai pelindung pada dasarnya memberikan efek penguatan yang sedikit pada struktur material, namun mereka melindungi bahan lain untuk menjaga kekuatan dan integritas mereka. Fungsi utama dari *coating* adalah untuk mengisolasi unsur reaktif dari lingkungan korosif dan harus memberikan penghalang yang kontinu pada substrat, dan sedikit saja ada titik kerusakan (*imperfection*) bisa menjadi titik fokus degradasi dan korosi pada substrat.

Berdasarkan definisi pada ASTM D1647, cat yaitu larutan dispersi yang dapat diubah menjadi larutan padat yang relative tidak tembus cahaya setelah digunakan sebagai lapisan tipis pada suatu permukaan bahan dasar.

Bahan-bahan utama yang digunakan untuk membuat lapis lindung dapat ditempatkan ke dalam salah satu dari tiga dasar



kategori yaitu wahana (*vehicle*), pigmen, dan aditif. Masing-masing kategori memiliki fungsi khusus dalam pembuatan lapis lindung.

- a. Wahana (*vehicle*), yaitu zat cair yang membuat cat untuk *coating* memiliki fluiditas dan bila mengering atau menguap akan meninggalkan selaput padat.
- b. Pigmen, tersuspensi dalam wahana. Pigmen merupakan partikel-partikel kristalin yang tidak larut didalam solvent. Pigmen dalam lapisan cat berfungsi sebagai pemberi warna dan penutup permukaan, mengurangi permeabilitas lapisan, memberi sifat daya tahan terhadap karat, mengentalkan cat sehingga lapisan yang lebih tebal dapat dicapai, serta melindungi lapisan dan permukaan dari efek sinar UV dan cuaca.
- c. Aditif, berfungsi untuk mempercepat proses pengeringan atau memungkinkan lapisan cat kering lebih tahan terhadap lingkungan kerja.
- d. *Binder* (bahan pengikat), berfungsi sangat penting dalam pembentukan lapisan. Bahan pengikat terdiri dari minyak atau resin atau campuran dari keduanya yang dapat mengering karena proses oksidasi dengan udara atau penguapan dari solvent.
- e. *Solvent*, merupakan pelarut organik dan solvent berfungsi untuk melarutkan dan mengencerkan bahan pengikat dan selama pengeringan cat, solvent ini akan menguap.
- f. *Extendet* (bahan pengisi), sebagai bahan pengisi digunakan pigmen yang tidak memiliki daya tutup dan biasanya dicampur dengan pigmen lain.

Keuntungan dengan adanya lapis lindung sebagai proteksi korosi, ada beberapa kerugian yang bisa menjadi bahan pertimbangan agar dapat memaksimalkan peran dan fungsi





*coating*. Keuntungan dan kerugian penggunaan *coating* seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Keuntungan dan Kerugian Penggunaan Metode  
*Coating* untuk Proteksi Katodik  
(Balai Besar Bahan dan Barang Teknik)

No.	Keuntungan	Kerugian
1	Mudah diaplikasikan	<i>Lifetime</i> lapisan pelapis terbatas ( <i>coating breakdown</i> )
2	Mudah dirawat atau direpair	Sifat mekanik relative rendah
3	Tersedia dalam jumlah yang melimpah (bahan pelapis)	Mengalami degradasi, khususnya oleh sinar Ultraviolet (UV)
4	Relative murah	Ketahanan terhadap temperatur relative rendah (Maksimal 200°C)
5	Efektif dalam pencegahan korosi	Dengan persiapan permukaan yang kurang baik dapat mengarah ke <i>Corrosion Under Insulation</i> (CUI)
6	Dapat diaplikasikan bersama-sama proteksi katodik	

### 2.3.1 Lapisan Organik dengan Cat

Pelapisan dengan cat sering kali dijumpai, biasanya lapisan cat *protective* mempunyai lapisan utama primer (*under coat*) dan lapisan luar (*top coat*). Lapisan primer mempunyai adhesi yang tinggi serta mengandung inhibitor, sedang top (*finishing coat*) bagian luar terutama ditekankan pada sifat tahan gores dan dekoratif (warna dan rupa).

Inhibitor dalam primer antara lain berbentuk *red-lead* ( $2\text{PbO}.\text{Pb}_2$ ), *white-lead* ( $\text{Pb}$  Karbonat), *calcium-plumbeate* ( $2\text{CaO}.\text{PbO}_2$ ), *zinc-chromate* dan serbuk logam Zn. Selain Zn-Cr sebagai inhibitor, Zn dan Al digunakan dalam cat sebagai proteksi



galvanis, sedang Cu ditambahkan untuk cat anti *fouling*. Pigmen pewarna adalah *red-oxide* (besi oksida, atau oksida sintesis) dan titanium oksida. Selain senyawa-senyawa tersebut diatas dalam cat mengandung juga pengikat (*oil varnish, resin* dan sebagainya) dan pengencer (*thinner*).

Adapun lapisan organik atau cat yang digunakan pada penelitian ini adalah cat *zinc-chromate*. Cat Zn-Cr ini termasuk dalam kategori cat *alkyd*. Cat *alkyd* menggunakan binder jenis *alkyd* resin. Binder ini paling banyak digunakan karena mempunyai sifat mudah diaplikasikan dan dapat dilapis ulang, mengering karena oksida dengan udara. Sedangkan pelarut yang banyak digunakan adalah senyawa hidrokarbon alifatik seperti mineral spirit.

Lapisan cat sebagaimana lapisan-lapisan lain harus merupakan barrier pemisah logam dan lingkungannya supaya mencegah terjadinya korosi. Daya tembus dari media korosi merupakan sesuatu yang penting, seperti halnya uap air dalam udara (*humid*). Apalagi air tersebut mengandung unsur-unsur kimia yang sangat korosif. Dengan demikian porositi dari cat perlu diperhatikan. Lapisan tipis uap air dipermukaan dibawah lingkungan udara lembab, kira-kira hanya 150-180 kali diameter molekulnya ( $500-600 \text{ \AA} = 1/2 \text{ mikron}$ ) yang cukup untuk menurunkan konduktif listrik permukaan logam. Lapisan cat harus dapat menahan tembusnya uap air tersebut. Tabel 2.4 berikut ini menunjukkan kecepatan tembus uap air untuk berbagai ukuran lubang.



Tabel 2. 4 Kecepatan Tembus Uap Air untuk Berbagai Ukuran Lubang

(Balai Besar Bahan dan Barang Teknik)

Diameter Lubang ( $\mu$ )	Kecepatan Tembus (mg/hari)
0.1	0.000001
0.5	0.000042
1.0	0.000100
2.0	0.000400
5.0	0.006000

Sedangkan pada Tabel 2.5 berikut ini menunjukkan kecepatan tembus cairan berupa air.

Tabel 2. 5 Kecepatan Tembus Cairan Air  
(Balai Besar Bahan dan Barang Teknik)

Diameter Lubang ( $\mu$ )	Kecepatan Tembus (mg/hari)
0.5	0.03
0.1	0.05
2.0	0.10
55.0	0.40
10.0	1.00

### 2.3.2 Jenis Lapis Lindung (*Coating*)

Meskipun cat memiliki bahan utama *pigmen*, *binder* dan *solvent*, tetapi biasanya dari binder dapat mengambil nama yang digunakan untuk menyebutkan jenis cat. Beberapa jenis cat, yaitu:  
a. Cat Minyak (*Drying Oils*)

Cat ini menggunakan binder jenis minyak yang dapat mengering karena reaksi oksidasi dengan udara seperti minyak lena (*linseed*), minyak tung, dan lain-lain. Kelemahan dari cat ini





adalah lama mengering, kurang tahan terhadap perlakuan mekanik, kurang tahan terhadap senyawa kimia, air dan cuaca dan dapat disabunkan. Sedangkan kelebihan dari cat jenis ini adalah relatif lebih murah, bisa disimpan lama, dan mudah diaplikasikan karena tidak memerlukan persiapan permukaan yang berat.

b. Cat *Alkyd*

Cat ini menggunakan binder jenis *alkyd* resin. *Binder* ini paling banyak digunakan karena mempunyai sifat mudah diaplikasikan dan dapat dilapis ulang, mengering karena oksidasi dengan udara. Pelarut yang banyak digunakan adalah senyawa hidrokarbon alifatik seperti mineral spirit.

c. Cat *Bitumen*

Cat yang menggunakan bitumen mempunyai sifat tahan terhadap di lingkungan air dan dapat diaplikasikan dengan lapisan yang tebal. Jenis cat ini tidak cocok dilapis ulang dengan cat lain. Penggunaan pigmen aluminium banyak digunakan untuk lingkungan dibawah air.

d. Cat *Chlorinated Rubber* (Karet Terklorinasi)

Binder yang digunakan terbuat dari karet alam yang mengalami klorinasi sekitar 67%. Cat ini termasuk *heavy duty coating*, mengalami pengeringan karena penguapan bahan pelarutnya. Tahan terhadap lingkungan asam, basa, air, dan cuaca. Tidak dapat disabunkan dan tidak tahan pelarut. Untuk mendapatkan hasil yang baik maka cat ini memerlukan persiapan permukaan yang sempurna (*blast cleaning*). Pelarut yang cocok untuk jenis cat ini adalah senyawa hidrokarbon aromatik seperti *xylene* atau *toluene*.

e. Cat *Vinyl*

Cat ini mengalami pengeringan karena penguapan pelarut dan termasuk *heavy duty coating*. Sifat-sifat ketahanannya hampir sama dengan cat *chlorinated rubber*, lebih ulet, tahan lama dan



lebih bersifat dekoratif. Pelarut yang cocok untuk jenis cat ini adalah senyawa-senyawa ester dan beton, dengan pelarut senyawa hidrokarbon aromatik.

f. Cat *Polyurethan*

Cat ini mengalami pengeringan karena reaksi kimia antara senyawa *isocyanate* dan *hardener* dengan senyawa *polyester* atau senyawa *polyether*. Cat ini termasuk *heavyduty coating* yang sifatnya sebagian besar sama dengan cat *epoxy*.

g. Cat *Silicate*

Cat ini menggunakan binder jenis *silicate* dan mengandung pigmen serbuk seng atau aluminium. Mengalami pengeringan karena reaksi antara binder dengan pigmennya. Pengeringan yang sempurna memerlukan waktu yang relatif lama. Untuk mendapatkan hasil pelapisan yang baik cat ini memerlukan persiapan permukaan yang sempurna. Sifat anti korosi dari cat *zinc-silicate* lebih baik daripada *zinc-epoxy*. Cat ini lebih tahan terhadap gesekan, panas dan cuaca tetapi tidak tahan terhadap asam atau basa.

h. Cat *Epoxy*

Cat *epoxy* mengalami pengeringan karena reaksi kimia, dimana *hardener* (senyawa *poliamin* atau *poliamid*) ditambahkan sebelum diulaskan. Cat *epoxy* ini termasuk *heavy duty coating*, memiliki kekerasan yang baik, tahan terhadap senyawa kimia, air, minyak dan pelarut. Sebelum diaplikasikan, permukaan yang akan dicat memerlukan persiapan permukaan yang sempurna. *Binder* ini juga banyak dikombinasikan dengan *binder* lain (*drying oil*, *coal tar*) untuk memperoleh sifat-sifat tertentu yang diinginkan lainnya. (Departemen Perindustrian dan Perdagangan, Balai Besar Bahan dan Barang Teknik).



### 2.3.3 Kerusakan dan Kegagalan *Coating*

Cacat *coating* atau cat dapat disebabkan karena beberapa faktor. Beberapa jenis cacat dapat terjadi secara bersamaan dan menurunkan kemampuan *coating* untuk melindungi struktur. Secara umum, cacat *coating* dapat terjadi selama penyimpanan, proses *drying*, *curing*, selama masih dalam umur pakai.

Fessler (2008) menjelaskan bahwa kombinasi pelapisan dan proteksi katodik menjadi metode utama dalam pencegahan atau mitigasi korosi. Proteksi katodik tidak dapat berdiri sendiri tanpa pelapisan karena struktur tanpa pelapisan membutuhkan proteksi arus yang besar dan juga biaya yang sangat tinggi. Pelapisan dibutuhkan untuk mengurangi jumlah permukaan yang terbuka seminimal mungkin. Rusaknya *coating* akibat terkelupasnya lapisan merupakan jenis kegagalan yang paling sering terjadi pada *pipeline*, ketika lapis lindung masih memiliki ketahanan yang tinggi. Kegagalan karena gangguan eksternal dan cacat konstruksi juga berpengaruh besar selain karena korosi.

Beberapa jenis cacat *coating* dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Beberapa Jenis Kerusakan yang Terjadi pada *Coating*

No.	Jenis Kerusakan	Keterangan
1	<i>Orange Peel</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cacat pengecatan dengan bentuk permukaan yang tidak merata</li><li>• Disebabkan karena kassarnya butiran yang kurang teratomisasidengan baik</li></ul>
2	<i>Runs</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Disebabkan oleh terlalu banyaknya cat yang menempel pada permukaan</li></ul>
3	<i>Pinholing</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Berupa lubang saat penyelesaian akhir atau lubang dempul atau primer yang disebabkan oleh <i>thinner</i>, udara, kelembabkan atau kondisi permukaan kurang baik</li></ul>





4	<i>Solvent Pop</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cacat berupa luka atau lecetnya lapisan cacat yang disebabkan oleh pengencer yang terjebak dalam lapisan atas atau lapisan bawah, terlebih lagi apabila dipengaruhi oleh pengeringan yang tidak tepat</li></ul>
5	<i>Peeling</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Disebabkan oleh hilangnya daya rekat antar cat dengan <i>substrat</i>, <i>topcat</i> dengan primer atau cat lama serta primer dengan subtract</li></ul>
6	<i>Mottling</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cacat yang sering terjadi pada cat jenis metalik, dimana serpihan metal mengapung sehingga membentuk garis atau mirip dengan jerawat</li></ul>
7	<i>Matting</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cacat berupa hilangnya kilap setelah lapisan cat mengering</li></ul>
8	<i>Lifting</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Perubahan pada lapisan cat dalam bentuk kerutan ketika lapisan cat diaplikasikan atau saat dikeringkan</li></ul>
9	<i>Blistering</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gelembung yang nampak pada lapisan cat atas</li></ul>

## 2.4 Proteksi Katodik

Proteksi Katodik (*Cathodic Protection*) merupakan metode yang paling penting dalam usaha pencegahan korosi. menurut Bardal (2003) proteksi katodik biasa digunakan untuk memproteksi struktur baja pada lingkungan tanah dan air laut. Prinsipnya adalah menggunakan penerapan arus listrik secara eksternal untuk menurunkan laju korosi menjadi nol. Permukaan logam yang terproteksi secara katodik dapat dijaga pada lingkungan korosif untuk jangka waktu yang lama. Pada sistem proteksi katoda, objek material yang dilindungi ditempatkan

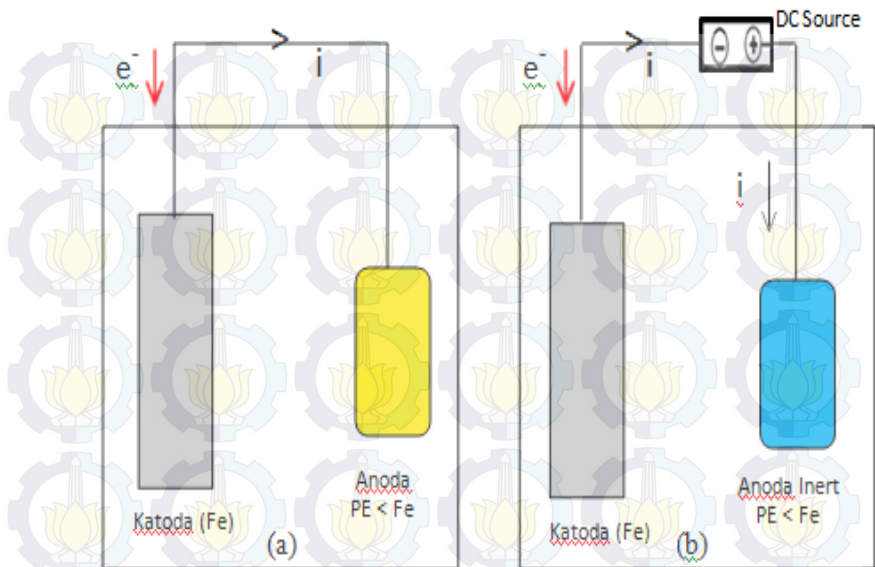


sebagai katoda. Sedangkan pada sistem proteksi anodik, objek material yang dilindungi ditempatkan sebagai anoda.

Pada sistem proteksi katodik ini sering kali digunakan dengan kombinasi pelapisan atau *coating*, dengan tujuan melindungi baja saat bebas dan area yang mengalami kerusakan *coating*. (Bardal, 2003). Perlindungan dengan cara tersebut sudah sering kali digunakan pada industri minyak dan gas. Dijelaskan pula pada *ASM Metals Handbook* (1987), bahwa semua jaringan *pipeline modern* dilapisi dengan organik protektik *coating* yang ditambahkan dengan sistem proteksi katodik supaya lebih kuat dalam mengurangi korosi pada sistem yang terlapisi.

Terdapat dua jenis *cathodic protection* yaitu *sacrificial anode cathodic protection* (SACP) yang menghubungkan struktur dengan logam yang lebih reaktif (potensial rendah) sehingga logam teroksidasi (anoda) dan *impressed current cathodic protection* (ICCP) yang menghubungkan struktur logam yang lebih pasif (potensial lebih tinggi) ditambahkan dengan arus paksa. kedua jenis proteksi dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.





Gambar 2. 1 Skematik Proteksi Katodik (a) *Sacrificial Anodes* (b) *Impressed Current*

Arus akan mengalir diantara dua buah logam selama ada beda potensial diantara keduanya dan akan berhenti jika telah mengalami kesetimbangan (potensialnya sama). Logam yang lebih rendah potensial elektrokimianya menjadi anodik dan mengalami oksidasi (terkorosi). Sedangkan logam yang lebih tinggi potensialnya elektrokimianya menjadi katodik dan mengalami reaksi reduksi sehingga terproteksi dari korosi. Prinsip ini ada pada tipe anoda tumbal yaitu prinsip sel galvanic. Dalam hal proteksi pada baja berdasarkan deret galvanic Al, Mg dan Zn yang digunakan untuk *sacrificial anode* ini.

Adapun kelebihan dan kelemahan pada masing-masing sistem adalah sebagai berikut.

### 1. Sistem Anoda Tumbal (*Sacrificial Anodes*)



Kelebihan :

- Perawatan mudah,
- Distribusi arus seragam,
- Instalasi sederhana, tidak terlalu kompleks,
- Tidak memerlukan power atau tenaga dari luar,
- Campur tangan dari katodik relative kecil.

Kelemahan:

- Sangat buruk jika hanya mengandalkan *coating*, lebih banyak membutuhkan anoda yang digunakan sebagai tumbal,
- Arus keluar relatif kecil. Arus hanya memiliki driving potensial yang terbatas, karena cakupan daeran perlindungan pada material terbatas untuk masing-masing anoda,
- Sangat tidak efektif untuk daerah yang memiliki resistivitas tinggi.

## 2. Sistem Arus Paksa (*Impressed Current*)

Kelebihan :

- Satu instalasi sistem bisa melindungi permukaan yang lebih luas dari struktur,
- Sangat aplikatif untuk range tegangan dan arus yang besar,
- Untuk material yang memiliki *coating* yang buruk, bahkan sangat buruk sekalipun bisa terlindungi dengan sistem ini,
- Tegangan dan arus dapat diatur edemikian rupa sewaktu-waktu sesuai kondisi yang diperlukan,
- Arus yang besar bisa dihasilkan dengan hanya satu *ground bed*.

Kelemahan :

- Tenaga dari luar sangat dibutuhkan, maka sistem ini mudah terserang kegagalan pembangkit dari luar jika mengalami masalah,
- Sistem ini dipengaruhi oleh sistem lain,

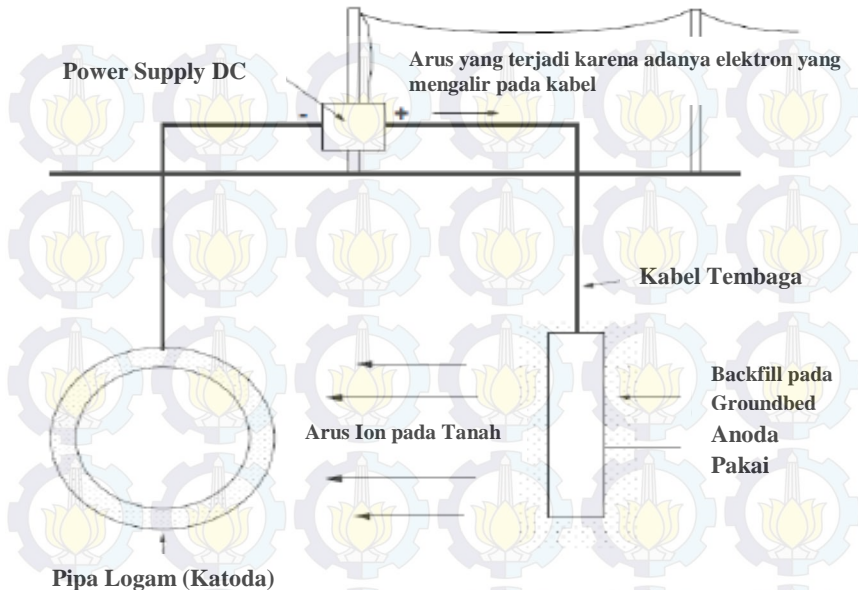


- Overproteksi bisa menyebabkan kerusakan pada *coating* dan memicu *hidrogen embrittlement*.

#### **2.4.1 Proteksi Katodik Arus Paksa (*Impressed Current Cathodic Protection*)**

*Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* adalah proteksi katodik yang menggunakan sumber arus dari luar, biasanya berasal dari arus AC yang dilengkapi dengan penyearah arus (*rectifier*), sehingga menjadi arus DC. Sumber arus DC ini yang akan memberikan *supply* elektron menuju sistem selama bekerja (proteksi). Pertimbangan penggunaan ICCP lebih banyak digunakan adalah kapasitas *output* yang jauh lebih besar dibandingkan *sacrificial anode*. Sehingga bisa digunakan untuk proteksi skala besar dan struktur tanpa lapis lindung (*bare structures*). ICCP digunakan untuk proteksi yang membutuhkan arus proteksi yang tinggi dan memiliki ketahanan elektrolit yang tinggi. Biasanya sistem ICCP ini sering digunakan dengan kombinasi teknologi pelapisan.

Mekanisme proteksinya, arus mengalir dari *rectifier* menuju anoda, lalu dari anoda melalui elektrolit menuju ke permukaan struktur, kemudian mengalir sepanjang struktur dan kembali ke *rectifier* melalui konduktor elektrik. Karena struktur menerima arus dari elerktrolit, maka struktur menjadi terproteksi. Komponen dasar yang membentuk sistem proteksi katodik arus paksa (ICCP) ini terdiri dari katoda yaitu logam yang akan dilindungi, sumber listrik DC (*rectifier*), anoda inert (*ground bed* atau *anode bed*), kawat penghubung (*metallic circuit*) antara anoda dan katoda, seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2. 2 Rangkaian Sistem ICCP (Pierre, 2000)

Ketentuan dalam pemasangan kabel untuk ICCP adalah sebagai berikut:

1. *Pipeline* dihubungkan ke terminal negatif (-) rectifier dari sirkuit
2. Anoda dihubungkan ke terminal positif (+) rectifier dari sirkuit.

Adapun kelebihan dan kekurangan pada sistem ICCP ini sebagai berikut.

- Kelebihan :
  1. Cocok untuk semua nilai resistivitas,
  2. Jumlah anoda yang digunakan lebih sedikit, bahkan untuk elektrolit dengan tahanan yang tinggi,





3. Sistem dapat didesain untuk masa guna lebih dari 20 tahun,
  4. Kapasitas *output* yang sangat tinggi. Jumlah arus yang dapat dirancang pada sistem bervariasi mulai dari *ampere* yang kecil hingga ratusan *ampere*, sehingga jangkauan proteksi yang diberikan besar,
  5. Fleksibilitas kapasitas *output*. *Output* dari sumber arus dapat diatur dengan mudah untuk mengakomodasikan perubahan tahanan sirkuit atau kebutuhan arus, sehingga level proteksi juga dapat dikontrol sesuai kebutuhan.
- Kekurangan :
    1. Biaya perawatan lebih tinggi dibandingkan sistem anoda tumbal,
    2. Resiko yang didapatkan relatif tinggi yang dapat menyebabkan efek interferensi arus. Biasa terjadi pada struktur terproteksi yang terdekat,
    3. Biaya instalasi peralatan listrik lebih mahal dan membutuhkan perlengkapan yang kompleks,
    4. Pengaruh *supply* energy dari *rectifier* yang vital. Kerusakan sedikit saja akan berakibat fatal pada kinerja sistem proteksi.

## 2.5 Potensial Korosi

Logam yang terkorsi dalam lingkungan basah mempunyai suatu nilai potensial tertentu, yang merupakan campuran antara potensial katodik dan anodik pada rangkaian terbuka. Nilai potensial ini umumnya, logam akan terkorosi dan nilai potensial tersebut dinamakan potensial korosi.

Bila potensial logam diturunkan, maka logam akan cenderung bertahan sebagai logam karena lebih stabil dan sebaliknya bila potensial logam dinaikan akan cenderung menjadi



ion (ion stabil) atau terkorosi. Dari uraian tersebut, setiap penurunan potensial dari potensial katodik logam akan cenderung lebih stabil dan laju korosinya berkurang. Makin besar arus listrik yang dialirkan, makin besar penurunan potensial dan logam makin stabil atau tingkat laju korosi makin rendah.

Pada saat praktek kita tidak dapat menurunkan potensial secara sembarang. Penurunan yang berlebihan menjadikan suatu kerugian dari segi biaya dan juga dari segi teknis. Oleh karena itu, terdapat suatu kriteria proteksi yang perlu diketahui dan diperhatikan. Kriteria ini umumnya adalah untuk setiap jenis logam dan lingkungannya.

## **2.6 Elektroda Reference**

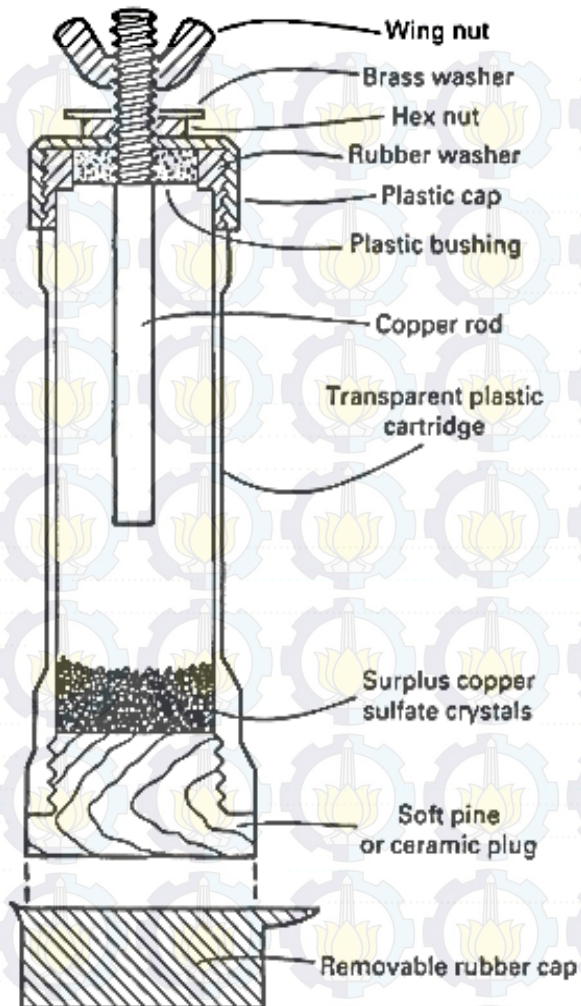
Elektroda acuan yang biasa digunakan pada lingkungan tanah adalah elektroda  $\text{Cu/CuSO}_4$ . Elektroda acuan merupakan suatu elektroda yang memiliki tingkat kestabilan yang tinggi untuk mengukur nilai potensial. Stabilitas yang tinggi dari elektroda acuan telah mengacu pada istem redoks (reduksi oksidasi) (Allen, 2000). Elektroda acuan yang baik mempunyai tingkat perubahan potensial yang tidak dipengaruhi oleh temperatur lingkungannya. Jika voltmeter dihubungkan dengan elektroda acuan dan baja, maka potensial yang terbaca sesungguhnya merupakan gabungan dari dua jenis potensial. Masing-masing potensial itu disebut potensial *Half Cell* (Gurrappa, 2005). Pada Tabel 2.7 dapat dilihat beberapa jenis elektroda standar dengan tingkat potensialnya.



Tabel 2. 7 Jenis Elektrode Pembanding , Besar Potensial Terhadap Standar Hidrogen dan Aplikasi (*Balai Besar dan Barang Teknik*)

Jenis Elektrode Standar	Potensial Terhadap Potensial Standar Hidrogen, V
Cu/CuSO <sub>4</sub> (CSE, <i>Copper/Copper Sulfate Elect</i> ). (jenuh)	0.33 (untuk lingkungan tanah)
Ag/AgCl ( <i>Silver/silver Chlorida</i> )	0.25 (untuk lingkaran laut)
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ( <i>Calomel, SCE</i> ), jenuh	0.24 (untuk lingkungan klorida, lab)
Hidrogen (SHE)	0.00 (hanya untuk arbitrase)
Zn	-0.76 (untuk lingkungan laut, bila untuk tanah dengan backfill)

Untuk sistem ICCP di media tanah seperti sudah dijelaskan pada tabel 2.7 yaitu menggunakan elektroda standar Cu/CuSO<sub>4</sub>. Berikut ini adalah gambar 2.3 merupakan elektroda standar Cu/CuSO<sub>4</sub>.



Gambar 2. 3 Elektrode Standard  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$   
(ASM Metals Handbook, Vol 13 : 1987)





Penggunaan elektroda acuan dalam pengukuran korosi yaitu dengan menyiapkan sebuah sel tiga-elektroda. Sel tiga-elektroda merupakan perangkat laboratorium baku untuk penelitian kuantitatif terhadap sifat-sifat korosi suatu material. Secara skematik susunan tiga elektroda tersebut seperti pada Gambar 2.5. Komponen sel ini terdiri dari 3 elektroda utama, yaitu:

- a. Elektroda Kerja (*Working Electrode*)  
Ini merupakan sebutan untuk elektroda yang sedang diteliti.
- b. Elektroda Pembantu (*Auxiliary Electrode*)  
Elektroda yang dimaksud adalah elektroda kedua yang dimaksudkan khusus untuk mengangkut arus dalam rangkaian yang terbentuk. Elektroda ini diperlukan untuk pengukuran potensial.
- c. Elektroda Acuan (*Reference Electrode*)  
Elektroda ini dimaksudkan sebagai titik dasar yang *fixed* untuk mendasari pengukuran-pengukuran potensial elektroda kerja.

Ketiga elektroda ditempatkan dalam sebuah bejana gelas yang sesuai, yang kemudian diisi dengan satu atau dua larutan elektrolit yang diperlukan. Elektrode referensi yang baik mempunyai:

- a. Potensial elektroda referensi yang stabil. Stabilitas yang tinggi akan tercapai jika material yang digunakan untuk elektroda maupun pengisinya telah di ketahui karakteristiknya dengan baik.
- b. Perubahan potensial elektroda referensi terhadap perubahan temperatur harus kecil.



## 2.7 Anoda Grafit

Anoda merupakan suatu elektroda yang digunakan pada sel elektrokimia, bila terdapat arus listrik yang mengalir maka akan menimbulkan polarisasi didalamnya. Arus listrik yang mengalir berlawanan dengan arah pergerakan dari elektron. Menurut *ASM Metals Handbook Vol 43* (1987), anoda yang digunakan pada sistem ICCP harus bersifat anti korosi dan bisa bertahan lama di lingkungan tempat digunkannya. Untuk kebanyakan kasus pada sistem ICCP menggunakan anoda grafit. Yang juga digunakan pada lingkungan laut karena sifatnya yang imun terhadap klorida. Sifat bawaan dari anoda grafit yang relatif getas sehingga harus disimpan dan diperlakukan dengan hati-hati. Laju konsumsi grafit tergolong rendah dengan variasi ukuran yang bisa disesuaikan dengan kebutuhan proteksi. Pada ICCP ini anoda yang digunakan memiliki potensial electrode yang lebih positif. Arus elektron seharusnya mengalir dari struktur pipa ke anoda *inert* yang digunakan, namun arus searah DC dari transformer *rectifier* memaksa arus elektron tetap menuju ke struktur (pipa), karena arus terpasang memiliki tegangan dorong yang lebih tinggi maka metode ini dapat digunakan untuk luasan proteksi yang besar dengan anoda tunggal meskipun ditempatkan jauh dari struktur (pipa). Beberapa anoda yang digunakan pada sistem ICCP dapat dilihat pada Tabel 2.8.



Tabel 2. 8 Beberapa Anoda yang Digunakan pada Sistem ICCP  
(Threthwey, 1991)

Bahan	Konsumsi ( $\text{kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ )	Penggunaan
Platium dan Logam Lapis Platium	$8 \times 10^6$	Lingkungan laut
Besi Silicon Tinggi	0.25 – 1.0	Sistem air minum, pipa bawah tanah
Baja	6.8 – 9.1	Lingkungan laut
Besi	9.5	Lingkungan laut
Besi Cor	4.5 – 6.8	Lingkungan laut
Timbal Platium	0.09	Lingkunga laut
Timbal Perak	0.09	Lingkungan laut
Grafit	0.1 – 1.0	Lingkungan laut, sistem air minum

Anoda grafit ini berbentuk silinder. Anoda jenis ini sering digunakan karena *consumption rate* yang tergolong kecil. Laju konsumsi grafit di beberapa kondisi dapat dilihat pada tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Laju Konsumsi Anoda Grafit (Shreir,1993)

Enviroment	Wastage Rate ( $\text{kg A}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	Current Density ( $\text{Am}^{-2}$ )
Backfill	0.9	10.8
Hot water	0.9	-
Seawater	0.045	4.5 – 11.5
Seawater	Little	10.8
Fresh water	0.45	3.5
Fresh water	0.45	2.7
Mud	0.91 – 1.36	71





## 2.8 Korosi Baja Karbon di Dalam Tanah

Faktor lingkungan yang menyebabkan terjadinya korosi salah satunya adalah tanah. Korosi pada tanah merupakan fenomena yang kompleks, dengan berbagai variabel yang saling terkait. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi laju korosi pada tanah antara lain resistivitas, keasaman (pH), kelembaban (*moisture content*), kelarutan garam, aerasi (kandungan oksigen), kadar sulfat, kadar klorida, tekstur dan struktur tanah serta aktivitas mikrobiologi. (Bardal, 2003)

Korosi yang terjadi didalam tanah termasuk kedalam proses elektrokimia. Tetapi dalam kondisi tertentu mekanisme yang terjadi dapat berubah dari atmosferik menjadi *completely immersed* atau terendam dalam tanah seluruhnya. Jadi kondisi tanah yang berlaku akan bergantung pada kepadatan tanah dan kelembabannya. Adapun kelembaban dalam tanah sendiri dapat diakibatkan oleh adanya kapilaritas dan poros pada tanah yang telah tercampur dengan cuaca (angin, air) maupun pembusukan organik.

Baja karbon murni akan mengalami korosi di hampir semua lingkungan atmosfer bila kelembaban di dalam tanah relatif mencapai lebih dari 60%. Reaksi antara logam dengan lingkungannya yang terjadi secara elektrokimia dapat menyebabkan penurunan mutu dan kualitas dari logam tersebut. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor lingkungannya diantara lain pemasukan  $O_2$ , pH tanah, dan hadirnya ion-ion agresif seperti klorida (Thretheway, 1991).

### 2.8.1 Resistivitas Tanah

Salah satu faktor yang digunakan sebagai indikator utama terhadap korosi pada tanah adalah resistivitas tanah. Saat transfer ion bereaksi dengan korosi pada tanah, resistivitas tanah yang





tinggi menyebabkan reaksi korosi akan lebih lambat. Resistivitas tanah berkurang dengan meningkatnya kandungan air dan konsentrasi ion. Resistivitas tanah memiliki pengaruh yang kuat terhadap laju korosi. Tanah dengan resistivitas yang tinggi dapat memberikan banyak aliran arus. Pada umumnya tanah yang agresif memiliki resistivitas yang rendah. Resistivitas yang rendah pada suatu saat tertentu menyumbangkan kontribusi dalam terbentuknya sel makro galvanik (dengan jangkauan sampai berkilometer). (Bardal, 2003).

Penentuan resistivitas sangatlah penting dalam membuat sebuah *survey* detail mengenai perpipaan. Selain dalam menafsirkan seberapa parahnya daerah korosif, profil resistivitas tanah juga sangat membantu selanjutnya dalam pemilihan tempat untuk instalasi proteksi katodik. Tingkat kekerasan korosi pada tanah berdasarkan resistivitas tanah dapat dilihat pada tabel 2.10 berikut:

Tabel 2. 10 Pengaruh Resistivitas Tanah Terhadap Laju Korosifitas (Loke, 2000)

Soil Resistivity (ohm cm)	Tingkat Korosifitas
>20000	Tidak Korosif
10000 – 20000	Korosif Rendah
5000 – 10000	Korosif Rendah
3000 – 5000	Korosif
1000 – 3000	Sangat Korosif

Pada umumnya, resistivitas yang tinggi akan menunjukkan laju korosi yang rendah. Resistivitas tanah meningkat dari beberapa faktor, semisal tanah yang memiliki partikel halus memiliki resistivitas rendah. Akan tetapi resistivitas tanah bukan satu-satunya parameter yang menyebabkan kerusakan korosi. Nilai resistivitas tanah dapat dipengaruhi oleh kandungan air, pH



tanah, dan karakteristik fisik dari tanah itu sendiri. Dari satu tanah dengan yang lain memiliki nilai resistivitas yang berbeda-beda. Pada tabel 2.11 ini dapat dilihat beberapa jenis tanah beserta nilai resistivitasnya.

Tabel 2. 11 Nilai Resistivitas Tanah (Loke, 2000)

Material	Resistivity ( $\Omega\text{m}$ )	Conductivity (Siemen/m)
<b>Igneous and Metamorphic Rocks</b>		
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalt	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^6$	$2,5 \times 10^{-8} - 1,7 \times 10^{-3}$
Marble	$10^2 - 2,5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>Sedimentary Rocks</b>		
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$	$2,5 \times 10^{-4} - 0,125$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0,05$
Limestone	$50 - 4 \times 10^2$	$2,5 \times 10^{-3} - 0,02$
<b>Soils and Water</b>		
Clay	$1 - 100$	$0,01 - 1$
Alluvium	$10 - 800$	$1,25 \times 10^{-3} - 0,1$
Groundwater (fresh)	$10 - 100$	$0,01 - 0,1$
Sea water	$0,2$	$5$

### 2.8.2 Kelembaban Tanah

Kelembaban (*moisture content*) adalah banyaknya jumlah air pada partikel udara. Dimana di dalam tanah terdapat komposisi udara dan air yang dapat berubah-ubah apabila terjadi proses penambahan atau pengurangan air di tanah tersebut. (Rhamdani, 2008). Air merupakan elektrolit yang memicu reaksi elektrokimia sehingga menyebabkan korosi. Banyaknya kandungan air dalam tanah dapat menentukan kemampuan tanah sebagai media



elektrolit dalam reaksi korosi. Dengan jumlah yang banyak, kandungan air yang berada di tanah dapat mengalirkan elektron sehingga peristiwa terjadinya korosi sangat rentan terjadi. Perbedaan tersebut disebabkan oleh aliran air jenuh dan tidak jenuh pada tanah yang berhubungan dengan pergerakan air dari daerah yang basah menuju daerah yang kering. Kejenuhan air bergantung dari ukuran dan distribusi pori, tekstur, struktur, dan bahan organik.

Korosi pada tanah adalah jenis *aqueous* dengan mekanisme elektrokimia. Kondisi pada tanah dapat menggeser atmosferik menjadi keadaan *immersed* tergantung dari kepadatan tanah dan kadar kristal air. Banyak karakteristik tanah yang akan meningkatkan korosifitas seperti hujan, iklim, maupun reaksi pada tanah, meskipun mekanismenya merupakan elektrokimia.

Air mempunyai pengaruh dalam terjadinya korosi pada tanah. Pada tanah dibutuhkan untuk ionisasi untuk oksidasi pada permukaan logam dan juga dibutuhkan untuk ionisasi elektrolit tanah digunakan untuk melengkapi sirkulasi aliran arus pada aktivitas korosi. Kelembaban tanah sangatlah penting terhadap mekanisme korosi, tanah yang mengandung pasir kering akan lebih tanah korosi dibandingkan dengan tanah yang mengandung tanah liat basah.

Kapasitas pengikatan kelembaban dari tanah adalah kemampuan tanah untuk mengikat air yang ada dalam bentuk air kapiler. Kapasitas pengikatan air pada tanah sangat dipengaruhi tekstur tanah. Tanah jenis pasir yang kasar mengandung sedikit air, sedangkan tanah jenis tanah liat yang halus mengandung banyak air sehingga memiliki kapasitas pengikat kelembaban lebih tinggi.





### **2.8.3 Tekstur dan Struktur Tanah**

Tanah terbentuk dengan kombinasi proses terjadinya cuaca maupun pembusukan organik. Tanah merupakan kumpulan mineral, bahan organik, air, dan gas (udara). Variasi sifat dan karakteristik tanah dapat mempengaruhi terjadinya korosi pada sebuah struktur. Tanah dibedakan berdasarkan komposisi dan interaksi terhadap beberapa faktor terhadap lingkungan.

Tekstur tanah merupakan distribusi partikel mineral dalam tanah. Tanah dengan kadar pasir yang tinggi memiliki kandungan air yang sedikit, sedangkan tanah liat mengandung banyak air. Tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikel. Kerikil mengandung partikel yang kasar ( $> 2\text{mm}$ ) dan tanah liat ( $> 0.002\text{ mm}$ ), sedangkan pasir dan lumpur diantaranya. Tanah yang baik mengandung partikel yang kecil dengan distribusi yang cukup dan sangat padat sehingga mencegah suplai oksigen (tapi bukan dari air), sedangkan kerikil memungkinkan oksigen dapat diangkut dengan mudah. (Bardal, 2003).

Faktor iklim seperti curah hujan, pergerakan udara serta cahaya matahari dapat menyebabkan perubahan sifat tanah seiring waktu. Curah hujan berhubungan dengan reaksi asam atau basa yang berkembang seiring perubahan struktur tanah. Saat curah hujan tinggi, air tersaring ke dalam tanah dan melarutkan komponen terlarut. Keasaman yang terbentuk tergantung dari banyak faktor seperti mineral awal tanah, aktivitas biologi dan temperatur, berhubungan dengan kondisi kelembaban. Curah hujan yang tinggi hingga sedang dengan temperatur hangat akan menurunkan aktivitas organik.

### **2.8.4 Keasaman (pH)**

Keasaman atau pH merupakan ukuran aktifitas ion hidrogen dalam larutan air tanah. Reaksi tanah menunjukkan sifat

---





keasaman dan kebasaan tanah dengan nilai pH. (Kartasapoetra & Sutedjo, 2002). Keasaman umumnya bukan variabel dominan yang menyebabkan kecepatan korosi, karena tanah biasanya memiliki nilai pH 5-8 sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap laju korosi. Semakin asam sifat tanah menunjukkan resiko korosi yang serius terhadap baja. Tingkat keasaman tanah disebabkan oleh *leaching* mineral, dekomposisi tumbuhan, limbah industri, hujan asam, dan aktivitas mikrobiologi.

pH pada tanah merupakan hal penting juga dikarenakan mengandung nutrisi seperti *nitrogen* (N), *potassium* (K), dan *phosphorus* (P) yang dibutuhkan tumbuhan untuk berkembang. Keasaman tanah menjadi bagian dari terbentuknya asam karbonat dari karbon dioksida akibat aktivitas biologi dan air dan juga disebabkan oleh perubahan cuaca, jenis mineral tanah, hilangnya kebasaan atau elemen asli.

### 2.8.5 Kelarutan Garam

Air pada tanah dianggap sebagai larutan untuk garam pada tanah menghasilkan larutan tanah. daerah dengan curah hujan besar konsentrasi garam yang terlarut semakin kecil akibat mekanisme pelarut. Sebaliknya, daerah gersang akan mengandung banyak garam yang dibawa ke lapisan permukaan tanah oleh pergerakan air.

Kation yang biasa terdapat di tanah adalah *potassium*, *sodium*, *magnesium* dan *calcium*. Elemen basa yang terkandung seperti *calcium*, *magnesium* dan sebagainya akan membentuk oksida yang tidak larut dan karbonat pada kondisi bukan asam. Endapan tak larut tersebut akan menghasilkan lapisan protektif pada permukaan logam sehingga mengurangi aktivitas korosi.

Anion pada tanah juga memiliki peranan penting sama dengan kation. Dimana anion berguna untuk mengurangi kation



dalam konduktivitas dan sel konsentrasi serta memiliki aksi tambahan jika bereaksi dengan kation sari logam dan membentuk garam yang tidak larut. Hubungan penting lain antara garam pada tanah dan korosi adalah aktivitas biologi. Kandungan garam pada tanah juga dapat disebabkan oleh aktivitas manusia. Semisal, penyuburan tanaman akan memasukan banyak bahan kimia ke dalam tanah. limbah industri seperti limbah garam dapat merubah larutan tanah sehingga bereaksi dengan struktur logam.

#### **2.8.6 Aerasi (Kandungan Oksigen)**

Oksigen bebas akan mempengaruhi proses korosi. oksigen berkombinasi dengan ion logam membentuk oksida, hidroksida dan garam logam. Volume air yang ada pada tanah berhubungan dengan konsentrasi oksigen yang terdapat didalamnya. Pada tanah kering, kondisi menjadi aerob dan kecepatan difusi oksigen menjadi lebih cepat. Perubahan kering ke basah akan meningkatkan laju korosi daripada lingkungan yang konstan. Konsentrasi oksigen meningkat dengan fluktuasi air dan udara juga memicu variasi aktivitas biologi pada tanah.

Tanah yang kasar (pasir) memiliki sifat drainase yang baik sehingga baja yang terkorosi pada lingkungan tanah ini sama seperti laju korosi baja yang terekspose dengan lingkungan atmosfer. Korosi yang disebabkan oleh perbedaan derajat aerasi dapat dihasilkan dari kondisi tanah yang berbeda. Dengan tingkat permeabilitas oksigen yang berbeda tersebut dapat mengakibatkan terjadinya aliran arus karena efek galvanik. Derajat aerasi juga dapat disebabkan oleh kedalaman tanah. Dengan semakin dalamnya tanah maka akan menurunkan derajat aerasi atau kandungan oksigennya.



### 2.8.7 Kadar Sulfat

Sulfat umumnya lebih tidak berbahaya terhadap reaksi korosi material logam. Keberadaan sulfat merupakan resiko utama terjadinya korosi jika dalam bentuk sulfida dengan adanya bakteri pengurang sulfat.

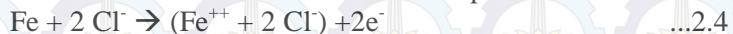
### 2.8.8 Kadar Klorida

Konsentrasi ion klorida pada elektrolit tanah dapat bervariasi sesuai dalam kondisi kering atau basah. Ion klorida umumnya bersifat merusak ketika bereaksi dengan larutan anodik logam dan dapat menurunkan nilai resistivitas tanah. Ion klorida ini dapat ditemukan secara alami pada tanah akibat air tanah payau.

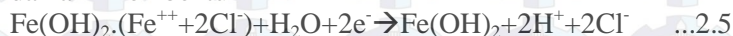
Klorida berperan sebagai katalis terhadap korosi ketika terdapat konsentrasi yang cukup pada permukaan baja untuk merusak lapisan *passive*. Klorida tidak dikonsumsi pada proses tetapi membantu untuk merusak lapisan *passive* oksida pada baja dan membuat proses korosi berjalan cepat.

Secara umum mekanisme korosi karena adanya ion klorida adalah sebagai berikut:

- a. Pada anoda, besi bereaksi dengan ion *chloride* membentuk *intermediate* larutan *iron-chloride* kompleks.



- b. *Iron-chloride* kompleks akan bereaksi dengan ion *hydroxyl* dan air membentuk



- c. Ion hidrogen kemudian dengan elektron membentuk gas hidrogen.



- d. Kehadiran air dan oksigen, *ferrous hydroxide* kemudian teroksidasi membentuk



Secara umum terdapat dua sumber ion klorida yaitu dari internal dan eksternal. Klorida terlarut merupakan penyebab





utama terjadinya korosi pada *pipeline*. Adanya ion klorida yang bersifat agresif akan membentuk senyawa asam dan bereaksi dengan selaput pasif yang bersifat basa, sehingga selaput pasif akan rusak dan *pipeline* akan terkorosi. Korosi akibat penetrasi ion klorida umumnya terjadi secara setempat (*pitting corrosion*).

### 2.8.9 Aktivitas Mikroba

Bakteri, jamur dan mikroorganisme lain merupakan hal utama pada korosi tanah. Beberapa mikroorganisme berkembang pesat pada kondisi aerob dan yang lain berkembang pada kondisi anaerob. Kondisi pH dan keberadaan nutrisi memegang peranan untuk jenis mikroorganisme yang berkembang pada lingkungan tanah tersebut. Bakteri anaerob akan meningkatkan korosifitas akibat proses metabolisme. Bakteri aerob akan mengakibatkan korosi mineral asam. Sedangkan jamur menyebabkan korosi akibat metabolisme, seperti asam organik dapat mendegradasi *coating organic* dan kayu.

### 2.9 Uji Resistivitas Tanah

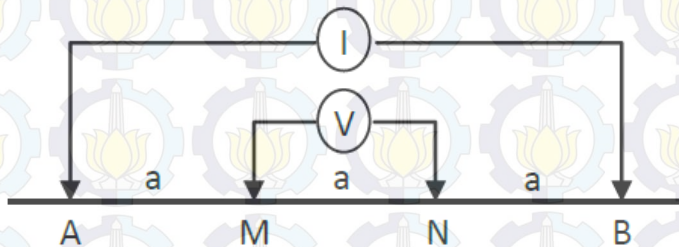
Nilai resistivitas tanah dapat digunakan untuk menentukan tingkat korosifitas tanah. Resistivitas tanah dapat diukur dengan menggunakan teknik metode wenner empat titik (dikembangkan oleh Wenner di Amerika) atau dengan elektromagnetik. Selain itu pengukuran resistivitas tanah juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode *soil box* dimana sampel diambil selama penggalian.

Prinsip metode resistivitas adalah dengan mengalirkan arus listrik ke dalam bumi. Metode resistivitas adalah salah satu metode geolistrik yang digunakan untuk mempelajari sifat resistivitas dari lapisan di bawah permukaan (Santoso, 2002).





Metode ini terdapat empat buah elektrodanya terletak dalam satu garis dan simetris terhadap titik tengah. Jarak MN pada konfigurasi Wenner selalu sepertiga ( $1/3$ ) dari jarak AB. Bila jarak AB diperlebar, maka jarak MN juga harus diubah sehingga jarak MN tetap sepertiga jarak AB. Keunggulan dari konfigurasi ini adalah ketelitian pembacaan tegangan pada elektroda MN lebih baik dengan angka yang relative besar karena elektroda MN yang relatif dekat dengan elektroda AB. Pada konfigurasi ini dapat menggunakan alat ukur multimeter dengan impedansi yang relatif lebih kecil.



Gambar 2. 4 Konfigurasi Wenner

Untuk menghitung nilai resistivitas tersebut menggunakan rumus matematika yaitu sebagai berikut :

$$\rho = 2 \pi a (V/I) \quad \dots (2.8)$$

Dimana,  $\rho$  merupakan nilai resistivitas dalam Ohm.meter,  $a$  merupakan jarak antar pin dalam meter,  $v$  merupakan potensial dari dua pin ditengah (volt) dan  $I$  merupakan arus yang diperoleh dari kedua pin terluar (ampere).



## 2.10 Acuan Penelitian

Tabel 2. 12 Acuan Penelitian

No.	Peneliti	Logam	Media	Sistem Proteksi	Metoda
1.	Dewi, 2011	Pipa API 5L <i>Grade X65</i>	NaCL	SACP	Pemberian lapis lindung, Menghitung laju korosi
2.	Ersal, 2011	Pipa API 5L <i>Grade B</i>	Air laut	ICCP	Mengevaluasi proteksi katodik yang terpasang, Pemilihan sistem proteksi baru
3.	R. Ibrahim, 2012	Pipa API 5L <i>Grade B</i>	Lingkungan tanah	ICCP	Pengujian mekanik, pengujian komposisi kimia pipa, pengujian laju korosi, pengujian metalografi
4.	Yahya, 2012	Baja AISI 1045	Lingkungan tanah rawa	SACP	Pengukuran berat, Pemasangan lapis lindung polietilena dan pemberian goresan, Pengukuran potensial arus galvanic dan potensial proteksi.
5.	Novian,	Baja	Lingkungan	ICCP	Pemberian



Laporan Tugas Akhir  
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

	2012	AISI 1045	air laut		lapis lindung polietilena, Penghitungan laju korosi
6.	Jane, 2013	Baja API 5L Grade B	Lingkungan laut	ICCP	Penghitungan desain ICCP, pengukuran E proteksi, XRD
7.	Nurus, 2014	Pipa API 5L Grade B	Salinitas air laur sebesar 3.2%, 3.5% dan 3.8%	ICCP	Pengukuran arus proteksi
8.	Lutfi, 2014	Pipa API 5L Grade B	Lingkungan air laut (temperatur air 15°C, 25°C, 35°C)	ICCP	Pemberian lapis lindung dan goresan, Pengukuran arus proteksi
9.	Faris, 2015	Baja AISI 1045	Lingkungan pH tanah	ICCP	Pemberian lapis lindung dan goresan, Pengukuran arus proteksi
10.	Trendy, 2015	Pipa APIL 5L Grade B	Lingkungan pH tanah	ICCP	Pemberian lapis lindung dan goresan, Pengukuran arus proteksi

Dengan demikian, maka dilakukan penelitian lanjutan mengenai pengaruh dari resistivitas tanah dan kadar air tanah dengan variasi goresan lapis lindung terhadap arus proteksi sistem *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) menggunakan baja API 5L Grade B.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

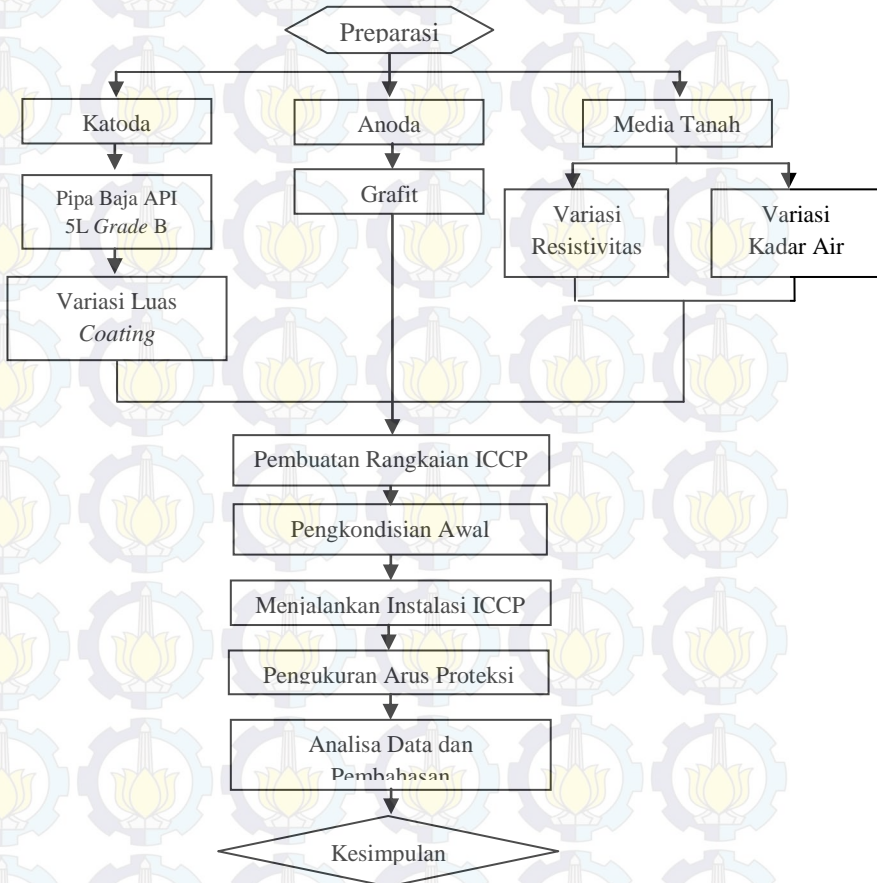




### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



### 3.2 Standard yang Digunakan

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti beberapa standard, yaitu:

1. Standard untuk pipa sebagai katoda : *API 5L Specification for Line Pipe*
2. Standard untuk pengujian : *NACE Standard TM-0169-95 Laboratory Corrosion Testing of Metals*

### 3.3 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Pipa *API 5L Grade B*
2. Anoda Karbon Grafit
3. *Epoxy Coating*
4. Cat *Zinc Chromate*
5. Tanah
6. Filler Perekat (Lem Tembak)

### 3.4 Alat Penelitian

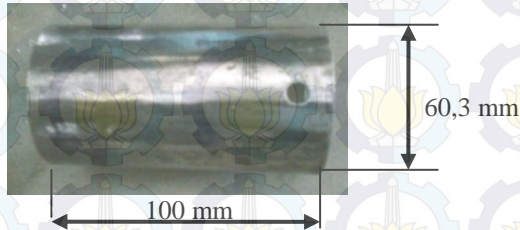
Peralatan yang digunakan untuk penelitian ini sebagai berikut:

1. Alat potong material yaitu mesin potong
2. *Countainer Box* Plastik
3. Kaca Bening untuk Sekat
4. Multitester Digital
5. Avometer
6. Elektroda  $\text{Cu/CuSO}_4$
7. Kabel
8. *Jack Banana*
9. *Jack Connector*
10. *Rectifier*
11. Mur dan Baut

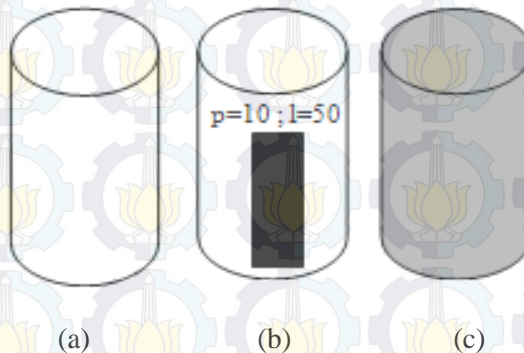
## 12. Mesin Bor

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Preparasi Spesimen (Katoda)



Gambar 3. 2 Spesimen Katoda



Gambar 3. 3 Ilustrasi Gambar Spesimen Katoda dengan Luas Goresan (a)  $0 \text{ mm}^2$  (*Full Coating*), (b)  $500 \text{ mm}^2$ , dan (c) Tanpa *Coating*

Langkah preparasi spesimen katoda sebagai berikut:

1. Memotong baja menjadi 30 bagian dengan gergaji mesin.
2. Baja dipotong dengan ukuran masing-masing dengan panjang 100 mm dan diameter 60.3 mm.
3. Melubangi spesimen katoda dengan menggebor salah satu ujungnya untuk tempat pemasangan kabel.



4. Membersihkan permukaan luar spesimen katoda dari produk korosi yang ada dengan gerinda dan amplas.
5. Menempelkan lakban dengan ukuran tertentu pada permukaan spesimen katoda sebagai tanda goresan (bagian yang tidak tertutup cat).
6. Melakukan pengecatan dengan *zinc chromate* sebanyak dua lapis secara merata.
7. Mengeringkan spesimen dibawah sinar matahari.
8. Melapisi spesimen dengan *epoxy filler* sebanyak dua lapis secara merata dan diulangi langkah nomor 7.
9. Memasangkan kabel pada katoda dengan mur dan baut pada baja kemudian ditutup dengan memberikan lem tembak.
10. Menutup kedua ujung baja dengan karet *sponge* agar tanah tidak masuk bagian dalam baja menggunakan lem tembak.
11. Memberikan tanda untuk masing-masing baja dan membuka dan membuka lakban yang menempel sehingga ada bagian yang terbuka pada permukaannya (goresan).

Spesimen (pipa 5L *grade* B) berjumlah 30 spesimen , 20 spesimen diantaranya dilapisi dengan lapis lindung *epoxy* dan 10 spesimen tidak dilapisi dengan lapis lindung *epoxy*. Dari 20 spesimen dengan lapis lindung, 10 spesimen diberi goresan dengan ukuran panjang 10 mm dan lebar 50 mm sehingga luas goresan pada lapis lindung  $500 \text{ mm}^2$  dan 10 spesimen tidak diberi goresan. Spesimen yang tidak diberi lapis lindung dan spesimen yang tidak diberi goresan dan lapis lindung digunakan sebagai pembanding.





### 3.5.2 Preparasi Anoda

Langkah preparasi spesimen anoda sebagai berikut :

1. Memotong anoda hingga berukuran tebal kurang lebih 13 mm dan dengan diameter 36 mm.
2. Memberi lubang pada bagian tengah anoda sebagai tempat memasang kabel anoda.
3. Memasang kabel pada anoda dan ditutup dengan lem tembak.



Gambar 3. 4 Preparasi Anoda

### 3.5.3 Preparasi Media Elektrolit

Pada penelitian kali ini menggunakan media tanah yang berbeda-beda sebagai elektrolitnya. Media tanah yang digunakan adalah variasi resistivitas dan variasi kadar air. Variasi resistivitas tanah menggunakan 5 jenis tanah yaitu dengan tanah pasir warna abu-abu, tanah rawa, tanah pasir warna hitam, tanah kapur dan tanah humus. Sedangkan variasi kadar air tanah yang digunakan 0% (kondisi kering) dan penambahan air suling sehingga menjadi basah (penambahan hanya sebesar 25%).

#### 3.5.3.1 Kadar Air

Pada preparasi media, menggunakan tanah yang memiliki kadar air yang berbeda seperti yang dijelaskan diatas. Untuk kadar air 0%, setiap jenis tanah dikeringkan terlebih dahulu



dibawah sinar matahari hingga benar-benar kering. Dan untuk membuat untuk membuat media tanah dengan menjadi memiliki kadar air 25% dengan mencampurkan air suling dalam jumlah tertentu sehingga menjadi kondisi yang diinginkan tersebut. Pada penelitian kali ini penambahan air yang digunakan untuk setiap media penanaman setiap spesimen sebanyak 600 ml, didapatkan dari volume media tanah yang digunakan. Setelah media tanah tersebut telah disiapkan langkah selanjutnya adalah menghitung nilai resistivitas dari media tersebut.

### 3.5.3.2 Menghitung Nilai Resistivitas Tanah

Selanjutnya menghitung nilai resistivitas dengan digunakan metode wenner untuk mendapatkan nilai resistivitas setiap tanah tersebut. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan dengan empat buah pin yang ditanam pada tanah yang akan diukur dan terletak dengan jarak yang sama dalam satu garis lurus. Dua pin terluar (pin 1 dan 4) digunakan untuk melewati arus sehingga dihubungkan dengan arus yang diseri dengan amperemeter yang merupakan elektroda arus. Dua pin yang ditanam ditengah (pin 2 dan 3) dan dihubungkan dengan voltmeter merupakan elektroda potensial untuk mengukur potensial saat dua pin terluar diberi arus. Besar arus dan potensial yang dihasilkan dicatat, kemudian dihitung dengan menggunakan rumus matematika metode wenner.

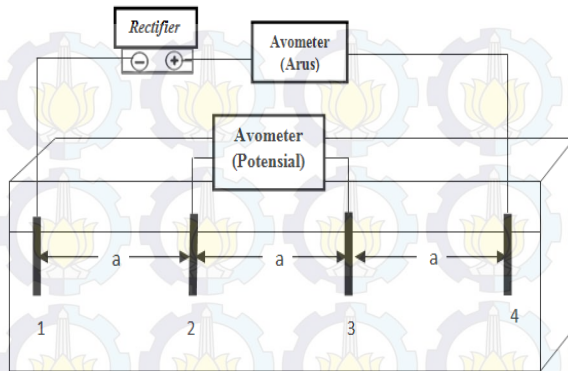
$$\rho = 2\pi a (V/I) \dots (3.1)$$

Dimana,  $\rho$  = resistivitas / tahanan jenis tanah (ohm-m)

$a$  = jarak antar pin (m)

$V$  = tegangan pada dua pin ditegang (volt)

$I$  = arus pada dua pin terluar (ampere)



Gambar 3. 5 Skema Pengukuran untuk Resistivitas Tanah

Pengambilan media tanah yang berbeda dan pemberian tambahan kadar air ini dimaksudkan untuk mengetahui nilai resistivitas tanah tersebut dengan adanya perbedaan kadar air tanah dan untuk mengetahui tingkat kebutuhan arus proteksi yang dibutuhkan pada lingkungan tanah tersebut.

### 3.5.4 Pengkondisian Spesimen

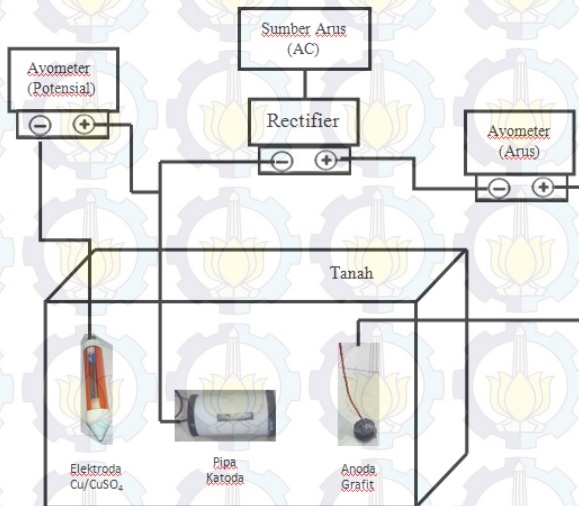
Sebelum dilakukan instalasi ICCP untuk kemudian mengukur arus proteksi yang diberikan, terlebih dahulu spesimen katoda dikondisikan dalam media tanah. Pengkondisian spesimen ini bertujuan untuk merusak lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan pipa. Pengkondisian spesimen ini dilakukan dengan cara imersi dalam media tanah selama 8 hari.

Dari 5 variasi resistivitas tanah dengan 2 variasi kadar air sebagai media yang berbeda, masing-masing ditempatkan dalam 4 *box container* dengan memberi tanda untuk membedakan tanah didalamnya.



### 3.5.5 Pembuatan Rangkaian ICCP

Setelah melakukan pengkondisian awal pada spesimen dalam media tanah maka langkah selanjutnya adalah perangkaian ICCP. Spesimen baja API 5L *grade B* dipasang sebagai katoda yang nantinya akan diproteksi, sedangkan grafit dipasang sebagai anoda. Katoda dan anoda dihubungkan melalui kabel dengan *rectifier* sebagai pengubah atau penyearah arus AC menjadi arus DC, serta avometer sebagai penunjuk potensial dan arus dalam rangkaian ICCP. Berikut adalah gambar skema dari rangkaian sistem ICCP.



Gambar 3. 6 Skema Rangkaian Sistem ICCP

### 3.6 Pengukuran Arus Proteksi

Penelitian ini pengujian korosi dilakukan dengan pengukuran kebutuhan arus proteksi yang dilakukan pengukuran *half-cell*





*potential* (potensial elektroda setengah sel). Beda potensial yang diukur berdasarkan perbedaan tegangan antara elektroda kerja dengan referensi yang dimasukkan kedalam tanah. Elektroda acuan (*reference*) yang digunakan adalah elektroda *reference*  $\text{Cu/CuSO}_4$ . Dalam sistem proteksi katodik ICCP, yang menjadi fokus utama sebagai parameter adalah tingkat seberapa besar potensial korosi dapat memberikan tingkat proteksi. Dari potensial korosi yang diketahui, arus proteksi dapat diatur sedemikian rupa agar nilai potensial spesimen berada dalam kondisi terproteksi.

Pengujian potensial spesimen dengan metode *half-cell potential* dilakukan untuk mengetahui tingkatan proteksi yang diberikan dan potensial korosi yang terjadi pada pipa. Pengukuran arus proteksi dilakukan selama 7 hari dengan interval setiap hari selama 7 hari dilakukan pengukuran data *half-cell potential* dengan menggunakan elektroda *reference*  $\text{Cu/CuSO}_4$ .

### **3.7 Rancangan Penelitian**

Rencana penelitian untuk mengetahui nilai resistivitas pada setiap jenis tanah ini dengan menggunakan metode wenner. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali agar mendapat nilai arus dan potensial yang lebih tepat dan pengukuran tersebut diambil nilai rata-ratanya. Pada tabel 3.1 dapat dilihat rencana pengukuran nilai arus dan potensial untuk setiap jenis tanah dengan variasi kadar air.



**Tabel 3. 1 Rencana Pengukuran Arus dan Potensial untuk  
Pengukuran Resistivitas Tanah**

No.	Jenis Tanah	Kadar Air	I (mA)	V (mV)	Resistivitas (Ohm.m)
1.	Tanah Pasir (Warna Abu-abu)	0%			
	Rata-rata				
2.	Tanah Rawa	0%			
	Rata-rata				
3.	Tanah Pasir (Warna Hitam)	0%			
4.	Tanah Kapur	0%			
	Rata-rata				
5.	Tanah Humus	0%			
	Rata-rata				
6.	Tanah Pasir (Warna Abu-abu)	25%			
	Rata-rata				
7.	Tanah Rawa	25%			
	Rata-rata				
8.	Tanah Pasir (Warna Hitam)	25%			
	Rata-rata				
9.	Tanah Kapur	25%			
	Rata-rata				
10.	Tanah Humus	25%			
	Rata-rata				



Sedangkan rencana penelitian untuk nilai arus proteksi dilakukan selama 15 hari dimana 8 hari pertama digunakan untuk proses imersi dan pengkondisiannya. Kemudian 7 hari berikutnya untuk pengukuran nilai arus proteksi spesimen setiap harinya sesuai pada standard NACE TM0169-2000 “*Laboratory Corrosion Testing of Metals*”. Data arus proteksi pada sistem didapatkan setelah arus tersebut diatur sehingga nilai potensial yang bekerja berada pada -850mV dimana baja akan mulai terproteksi. Pengukuran dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali agar mendapatkan nilai arus proteksi yang lebih tepat dan pengukuran tersebut diambil nilai rata-ratanya. Kemudian pengambilan data secara visual dengan skala makro dilakukan pada tiap-tiap spesimen untuk mengetahui perubahan fisik yang terjadi. Pada tabel 3.2 dapat dilihat rencana pengukuran nilai arus proteksi.

Tabel 3. 2 Rencana Pengukuran Arus Proteksi

No	Dimensi Cacat (mm)	Pengukuran Arus (mA) Hari ke-						
		1	2	3	4	5	6	7
1.	<i>Full Coating</i>							
	Rata-rata							
2.	P = 10							
	L = 50							
	Rata-rata							
3.	Tanpa Coating							
	Rata-rata							



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*





## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Analisa Data**

##### **4.1.1 Pengukuran Nilai Resistivitas dengan Variasi Kadar Air**

Analisa awal yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan mengukur nilai resistivitas tanah. Pengukuran ini dilakukan dengan metode wenner dengan skala laboratorium. Pengukuran ini menggunakan lima jenis tanah yang berbeda dan dengan variasi kadar air. Menggunakan jenis tanah yang berbeda dan variasi kadar air bertujuan untuk memperoleh nilai resistivitas tanah yang berbeda pula. Dari hasil pengujian tersebut diperoleh beberapa data untuk pengukuran nilai resistivitas yaitu nilai arus dan potensial. Berdasarkan data tersebut dihasilkan nilai resistivitas yang dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Nilai Resistivitas dengan Variasi Kadar Air

Jenis Tanah	Nilai Resistivitas (ohm.m)	
	Kadar Air 0%	Kadar Air 25%
Tanah Pasir (Warna Abu-abu)	1209.32	82.46
Tanah Rawa	1744.47	92.36
Tanah Pasir (Warna Hitam)	2985.04	97.81
Tanah Kapur	6165.39	123.69
Tanah Humus	8040.91	326.44

Tabel 4.1 diatas menunjukkan hasil nilai resistivitas dengan kadar air 0% atau kondisi tanah kering dan 25%. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai resistivitas terkecil dengan kadar air sebesar 0% terdapat pada jenis tanah pasir yang memiliki warna abu-abu dengan nilai sebesar 1209.32 Ohm.m. Sedangkan untuk nilai resistivitas tertinggi dengan nilai sebesar 8040.91 Ohm.m pada jenis tanah humus. Sedangkan untuk nilai



resistivitas dengan kadar air 25% nilai resistivitas terkecil dengan nilai sebesar 82.46 Ohm.m pada resistivitas tanah pasir berwarna abu-abu dan nilai tertinggi terdapat pada jenis tanah humus dengan nilai sebesar 326.44 Ohm.m. Berdasarkan data pada tabel 4.1 tersebut dapat dilihat bahwa dengan adanya peningkatan kadar air dalam tanah dapat menimbulkan penurunan nilai resistivitas tanah.

#### **4.1.2 Pengukuran Potensial Awal Pipa API 5L Grade B**

Sebelum dilakukan instalasi ICCP, maka dilakukan pengkodisian awal terlebih dahulu dengan cara imersi atau penimbunan pipa dalam lingkungan elektrolit tanah dengan variasi resistivitas dan kadar air tanah. Pengukuran potensial awal imersi ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan nilai potensial sebelum dan sesudah dilakukan instalasi ICCP, kemudian dapat menentukan arus proteksi. Pengukuran potensial korosi pipa untuk pengkodisian awal dilakukan dengan menggunakan elektroda reference Cu/CuSO<sub>4</sub> dan avometer.



Laporan Tugas Akhir  
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

**Tabel 4. 2 Kondisi Awal Setelah Imersi Pipa dalam Media Tanah Tanpa Instalasi ICCP selama 7 Hari untuk Variasi Kadar Air 0%**

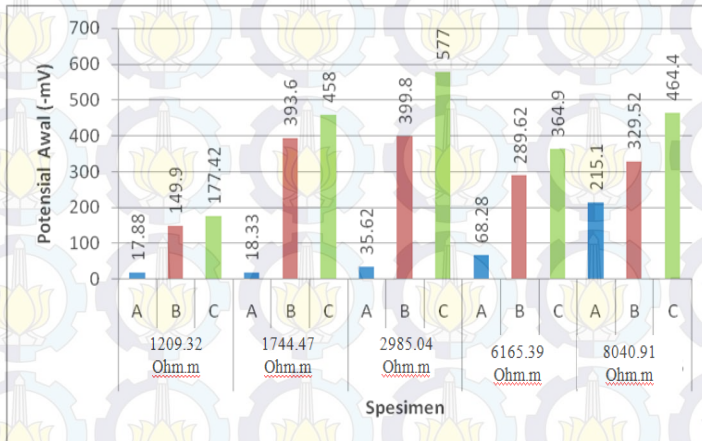
a	Spesimen	Potensial Korosi (-mV)
1209.32 Ohm.m	Full Coating	17.88
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	149.9
	Tanpa Coating	177.42
1744.47 Ohm.m	Full Coating	183.3
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	393.6
	Tanpa Coating	458
2985.04 Ohm.m	Full Coating	35.62
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	399.8
	Tanpa Coating	577
6165.39 Ohm.m	Full Coating	68.28
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	289.62
	Tanpa Coating	264.9
8040.91 Ohm.m	Full Coating	215.1
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	329.52
	Tanpa Coating	464.4

**Tabel 4. 3 Kondisi Awal Pipa dalam Media Tanah Tanpa Instalasi ICCP Setelah 7 Hari untuk Variasi Kadar Air 25%**

Resistivitas	Spesimen	Potensial Korosi (-mV)
82.46 Ohm.m	Full Coating	431.67
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	509.33
	Tanpa Coating	564.33
92.36 Ohm.m	Full Coating	475
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	604
	Tanpa Coating	798
97.81 Ohm.m	Full Coating	499.33
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	517.33
	Tanpa Coating	542
123.69 Ohm.m	Full Coating	506.33
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	706.33
	Tanpa Coating	802
326.44 Ohm.m	Full Coating	456
	Luas Gores Coating 500 mm <sup>2</sup>	558
	Tanpa Coating	561.67



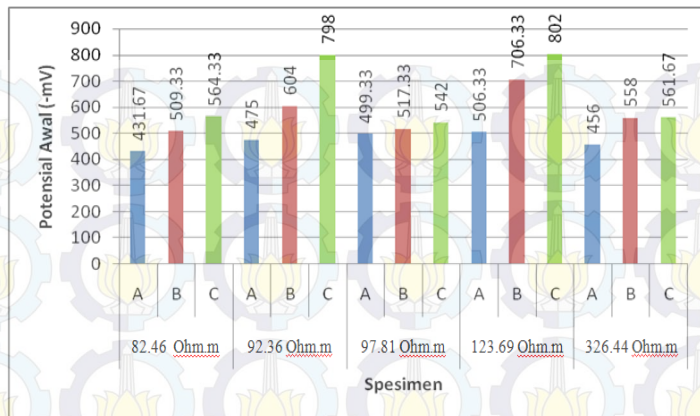
Berikut ini ditampilkan grafik potensial awal dalam media tanah dengan variasi kadar air sebesar 0%.



Gambar 4. 1 Grafik Potensial Awal dalam Media Tanah dengan Kadar Air 0% (A = *Full Coating*, B = *Luas Goresan 500 mm<sup>2</sup>*, dan C = *Tanpa Coating*)

Berikut ini ditampilkan grafik potensial awal dalam media tanah dengan variasi kadar air sebesar 25%.





Gambar 4. 2 Grafik Potensial Awal dalam Media Tanah dengan Kadar Air 25% (A = *Full Coating*, B = Luas Goresan 500 mm<sup>2</sup>, dan C = *Tanpa Coating*)

#### 4.1.3 Pengukuran Arus Proteksi

Pada penelitian ini menggunakan pipa API 5L *Grade B* sebagai katoda yang akan diproteksi dengan dimensi panjang 100 mm dan diameter 60.3 mm dan yang berperan sebagai anoda adalah grafit M120H *Impregnated Epoxy* dengan panjang 15 mm dan diameter 36 mm. Sebelumnya pipa API 5L *Grade B* tersebut dilapisi dengan cat primer *zinc chromate* dan *outer layer* dengan menggunakan *epoxy filler*. Hal tersebut bertujuan agar pipa dapat terproteksi dari korosi dan tidak terjadi kontak langsung dengan lingkungan sekitar. Setelah itu memberikan cact goresan berbentuk persegi panjang dengan luasan 500 mm<sup>2</sup> dan sebagai acuan spesimen ada yang diberi lapis lindung seluruhnya dan tidak diberi lapis lindung seluruhnya. Cacat gores pada lapis lindung yang diberikan sengaja bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh terhadap arus proteksi yang diberikan. Langkah selanjutnya memsang kabel tembaga pada katoda dan



anoda. Kemudian katoda dan anoda grafit tersebut dimasukkan kedalam media tanah dengan variasi resistivitas dan kadar air tanah 0% dan 25% selama 7 hari untuk merusak lapisan pasif yang terbentuk pada permukaan pipa yang terbuka. Pada kabel tembaga yang terpasang pada pipa dihubungkan ke kutub negatif (-) *rectifier* sedangkan kutub positif (+) *rectifier* dihubungkan ke anoda grafit. Antara katoda dan anoda dengan *rectifier* dipasangkan avometer yang menunjukkan nilai arus yang keluar dari *rectifier* menuju katoda. Arus keluaran dari *rectifier* ini disebut dengan arus proteksi yang dibutuhkan oleh pipa. Arus tersebut diatur dan dipantau selama 7 hari selama proses berlangsung.

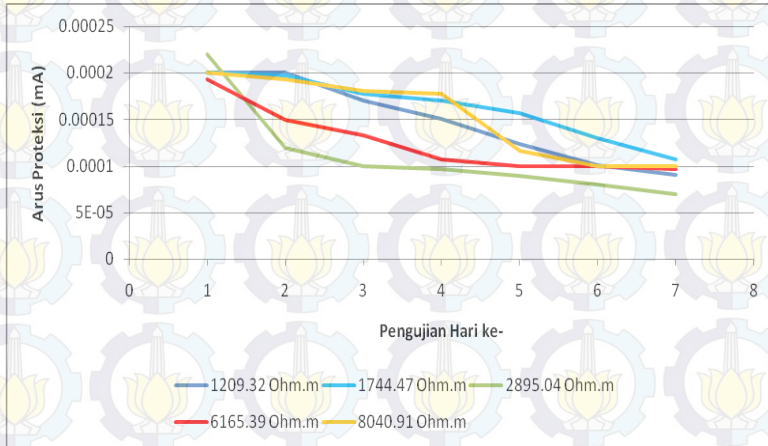
Spesimen diuji dalam lingkungan tanah dengan nilai resistivitas berbeda dengan nilai kadar air 0% dan 25%. Hal ini digunakan untuk mengetahui pengaruh yang ada terhadap arus proteksinya. Pengukuran arus proteksi dilakukan dengan menggunakan dua avometer. Avometer pertama digunakan untuk mengukur arus yang diberikan rangkaian. Dan avometer kedua digunakan sebagai acuan untuk nilai potensial -850mV terhadap elektroda referensi Cu/CuSO<sub>4</sub>. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan kabel tembaga pada pipa dengan kutub positif (+) avometer dan menghubungkan electrode referensi Cu/CuSO<sub>4</sub> dengan kutub negatif (-) avometer. Dengan mendapatkan nilai potensial terhadap elektroda acuannya, maka arus proteksi yang digunakan dapat diatur dengan sedemikian rupa sehingga nilai potensial yang bekerja pada spesimen dapat berada dalam kondisi imun atau dapat terproteksi.



#### 4.1.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi

Berdasarkan Luas Goresan Lapis Lindung Pada Pipa

##### 4.1.4.1 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan dengan Kadar Air Tanah 0%



Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan pada Kadar Air Tanah 0%

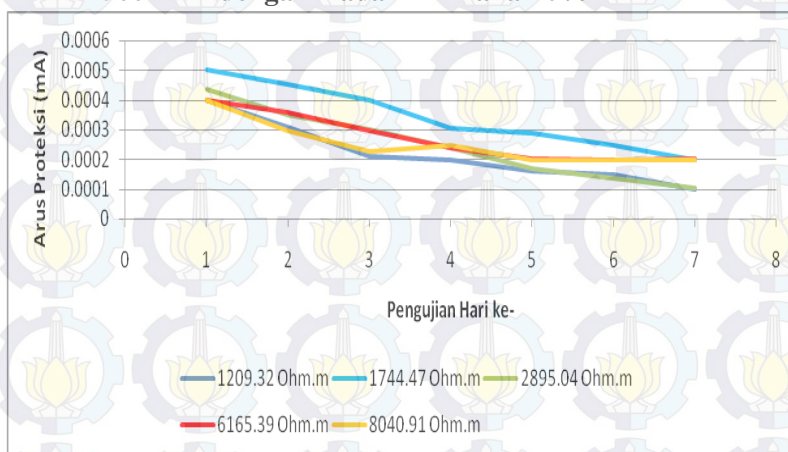
Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan berbeda nilai resistivitas tanah dengan kadar air tanah 0% untuk spesimen baja API 5L *Grade B* tanpa diberi goresan pada lapis lindungnya. Dapat dilihat pada gambar 4.3, pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 1209.32 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.00009–0.0002 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.000148 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas 1744.47 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.000107–0.0002 mA dengan nilai rata-rata 0.000163 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 2895.04 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.00007 –0.00022 mA dengan nilai rata-





rata sebesar 0.000111 mA. Kemudian pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 6165.39 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.000097–0.000193 mA dengan nilai rata-rata 0.000123 mA. Sedangkan pada tanah yang memiliki nilai resistivitas sebesar 8040.91 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0001–0.0002 mA dengan nilai rata-rata 0.000152 mA. Pada gambar 4.3, resistivitas tanah yang semakin tinggi memiliki kecenderungan untuk membutuhkan arus proteksi yang lebih rendah.

#### 4.1.4.2 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm<sup>2</sup> dengan Kadar Air Tanah 0%



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm<sup>2</sup> pada Kadar Air Tanah 0%

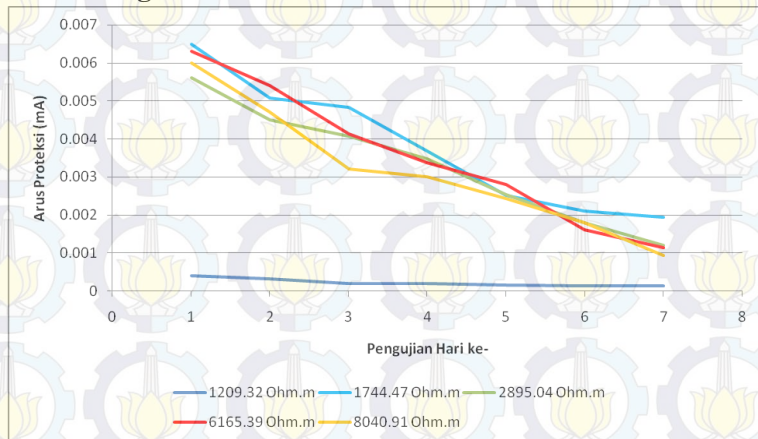
Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan berbeda nilai resistivitas tanah dengan kadar air tanah 0% untuk spesimen baja API 5L Grade B dengan luas goresan 500 mm<sup>2</sup>. Dapat dilihat pada gambar 4.4, pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar





1209.32 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0001–0.0004 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.00022 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas 1744.47 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0002–0.0005 mA dengan nilai rata-rata 0.00034 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 2895.04 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.000103–0.000435 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.000247 mA. Kemudian pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 6165.39 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.000197–0.0004 mA dengan nilai rata-rata 0.00027 mA. Sedangkan pada tanah yang memiliki nilai resistivitas sebesar 8040.91 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0002–0.0004 mA dengan nilai rata-rata 0.000254 mA. Pada gambar 4.4, resistivitas tanah yang semakin tinggi memiliki kecenderungan untuk membutuhkan arus proteksi yang lebih rendah.

#### 4.1.4.3 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa *Coating* dengan Kadar Air Tanah 0%



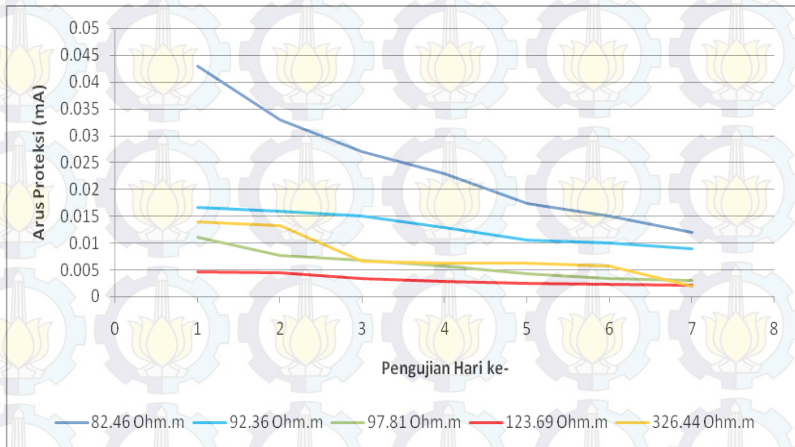
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa diberikan *Coating* pada Kadar Air Tanah 0%



Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan berbeda nilai resistivitas tanah dengan kadar air tanah 0% untuk spesimen baja API 5L *Grade B* tanpa *coating*. Dapat dilihat pada gambar 4.5, pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 1209.32 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.00014–0.0004 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.00022 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas 1744.47 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.00193–0.0065 mA dengan nilai rata-rata 0.00033 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 2895.04 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0012–0.0056 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.0033 mA. Kemudian pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 6165.39 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.00113–0.0063 mA dengan nilai rata-rata 0.0035 mA. Sedangkan pada tanah yang memiliki nilai resistivitas sebesar 8040.91 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.00093–0.006 mA dengan nilai rata-rata 0.0032mA. Pada gambar 4.5, resistivitas tanah yang semakin tinggi memiliki kecenderungan untuk membutuhkan arus proteksi yang lebih rendah.



#### 4.1.4.4 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan dengan Kadar Air Tanah 25%



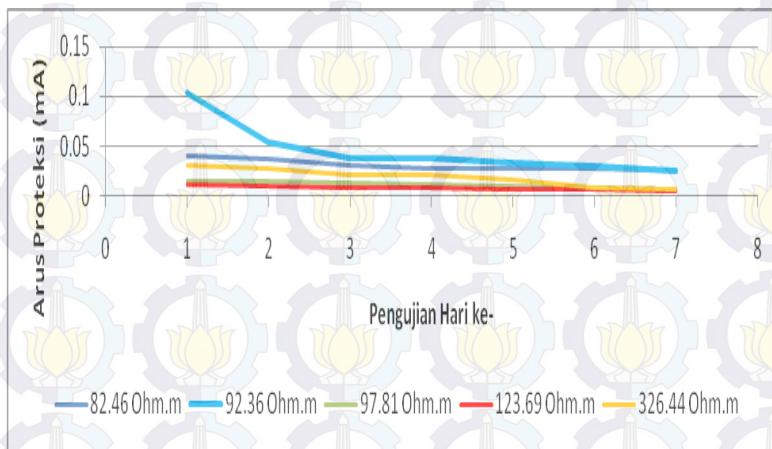
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa Goresan pada Kadar Air Tanah 25%

Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan berbeda nilai resistivitas tanah dengan kadar air tanah 25% untuk spesimen baja API 5L *Grade B* tanpa diberi goresan pada lapis lindungnya. Dapat dilihat pada gambar 4.6, pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 82.46 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.012–0.043 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.024 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas 92.36 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.009–0.0167 mA dengan nilai rata-rata 0.0129 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 97.81 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.003–0.011 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.006 mA. Kemudian pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 123.69 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0021–0.0047 mA dengan nilai rata-rata



0.0032 mA. Sedangkan pada tanah yang memiliki nilai resistivitas sebesar 326.44 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.002-0.014 mA dengan nilai rata-rata 0.0078 mA. Pada gambar 4.6, resistivitas tanah yang semakin tinggi memiliki kecenderungan untuk membutuhkan arus proteksi yang lebih rendah.

#### 4.1.4.5 Pengukuran Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm<sup>2</sup> dengan Kadar Air Tanah 25%



Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa dengan Luas Goresan 500 mm<sup>2</sup> pada Kadar Air Tanah 25%

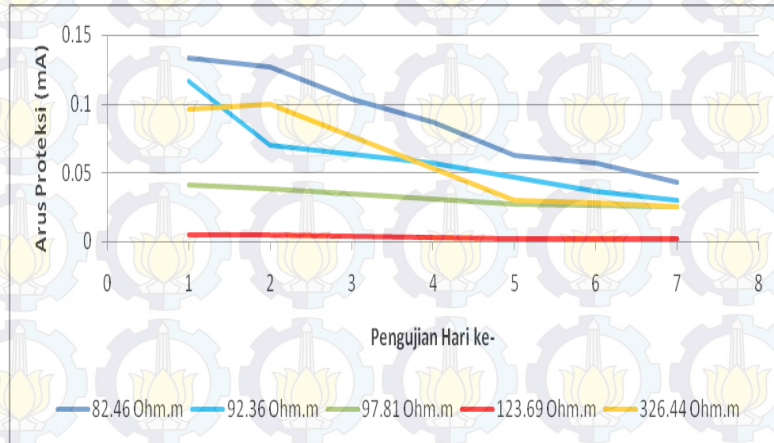
Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan berbeda nilai resistivitas tanah dengan kadar air tanah 25% untuk spesimen baja API 5L *Grade B* dengan luas goresan 500 mm<sup>2</sup>. Dapat dilihat pada gambar 4.7, pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 82.46 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0026–0.04 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.0309 mA. Pada tanah dengan





nilai resistivitas 92.36 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.025–0.103 mA dengan nilai rata-rata 0.0456mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 97.81 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.006–0.014 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.0104 mA. Kemudian pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 123.69 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.053–0.117 mA dengan nilai rata-rata 0.0084 mA. Sedangkan pada tanah yang memiliki nilai resistivitas sebesar 326.44 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0067-0.03 mA dengan nilai rata-rata 0.0184 mA. Pada gambar 4.7, resistivitas tanah yang semakin tinggi memiliki kecenderungan untuk membutuhkan arus proteksi yang lebih rendah.

#### 4.1.4.6 Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa *Coating* dengan Kadar Air Tanah 25%



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Arus Proteksi Pipa Tanpa *Coating* pada Kadar Air Tanah 25%

Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan berbeda nilai



resistivitas tanah dengan kadar air tanah 25% untuk spesimen baja API 5L *Grade B* tanpa *coating*. Dapat dilihat pada gambar 4.8, pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 82.46 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.043–0.133 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.0875 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas 92.36 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.03–0.117 mA dengan nilai rata-rata 0.006 mA. Pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 97.81 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0253–0.041 mA dengan nilai rata-rata sebesar 0.032 mA. Kemudian pada tanah dengan nilai resistivitas sebesar 123.69 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0021–0.047 mA dengan nilai rata-rata 0.0032 mA. Sedangkan pada tanah yang memiliki nilai resistivitas sebesar 326.44 Ohm.m arus proteksi yang dibutuhkan antara 0.0257–0.1 mA dengan nilai rata-rata 0.059 mA. Pada gambar 4.8, resistivitas tanah yang semakin tinggi memiliki kecenderungan untuk membutuhkan arus proteksi yang lebih rendah.

#### **4.1.5 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi Terhadap Resistivitas dan Kadar Air Tanah**

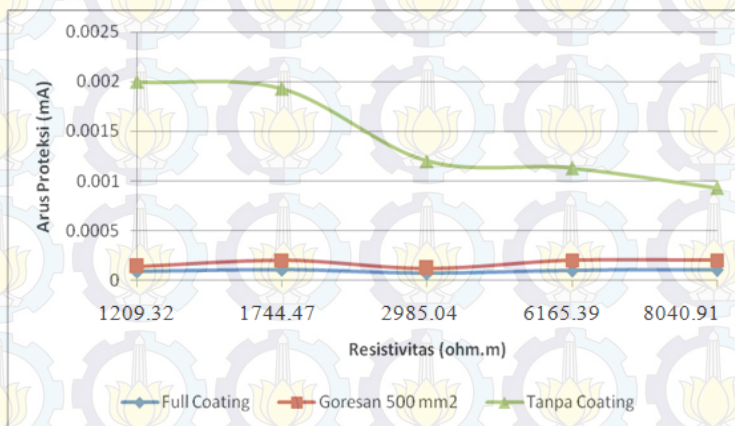
Analisa data dilakukan dengan membandingkan kebutuhan arus proteksi dari masing-masing pipa dalam media tanah dengan resistivitas dan kadar air tanah 0% dan 25%. Hasil didapatkan berdasarkan nilai rata-rata dari 3 kali pengulangan pengukuran. Kemudian pengambilan data dilakukan selama 7 hari.

##### **4.1.5.1 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Kadar Air Tanah 0% pada Hari ke 7**

Analisa data yang dilakukan dengan meneliti perbedaan arus proteksi dari masing-masing spesimen pada kondisi nilai



resistivitas yang berbeda dengan kadar air 0% atau kondisi tanah kering. Hasil yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata dari 3 kali pengulangan pengambilan data.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Kadar Air Tanah 0%

Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan resistivitas berbeda dalam variasi kadar air yang berbeda untuk spesimen baja API 5L Grade B. Nilai arus proteksi tersebut didapat dari hasil pengukuran arus proteksi pada hari ke 7. Kemudian hasil tersebut diplot kedalam grafik yang akan digunakan untuk menganalisa kebutuhan arus proteksi terhadap kondisi resistivitas tanah yang berbeda dengan kadar air 0% (keadaan tanah kering).

Berdasarkan data yang telah disebutkan diatas, arus proteksi yang dibutuhkan pada spesimen tanpa *coating* yang terbesar terdapat pada lingkungan tanah dengan resistivitas 1209.32 Ohm.m sebesar 0.002 mA dan terkecil pada resistivitas 8040.91 Ohm.m dengan nilai 0.00093 mA , pada spesimen dengan luas





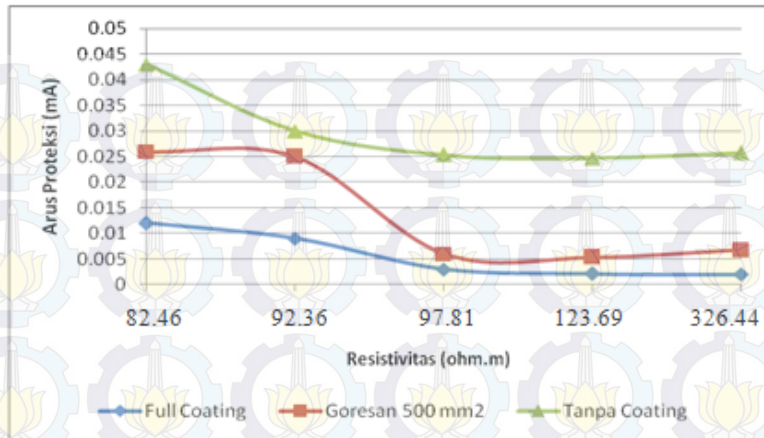
cacat gores lapis lindung 500 mm<sup>2</sup> arus proteksi terbesar pada resistivitas 1744.47 Ohm.m sebesar 0.0002 mA dan terkecil pada resistivitas ke 2985.04 Ohm.m sebesar 0.00012 mA. Sedangkan pada spesimen tanpa goresan lapis lindung arus proteksi terbesar pada resistivitas 1744,47 Ohm.m dengan nilai 0.00011 mA dan terkecil pada resistivitas 2985.04 yaitu 0.00007 mA.

Berdasar gambar 4.9 tersebut dapat dilihat bahwa kondisi spesimen tanpa diberi lapis lindung atau *coating* akan membutuhkan arus proteksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang diberi lapis lindung seluruhnya maupun spesimen yang diberi lapis lindung dengan luas cacat gores lapis lindung sebesar 500 mm<sup>2</sup>. Arus proteksi yang dibutuhkan pada spesimen tanpa lapis lindung atau *coating* dalam keadaan resistivitas yang semakin tinggi antara 0.00093-0.002 mA. Kemudian pada spesimen dengan luas cacat gores lapis lindung sebesar 500 mm<sup>2</sup> dengan keadaan resistivitas tanh semakin tinggi membutuhkan arus proteksi sebesar 0.00012-0.0002 mA. Sedangkan pada spesimen tanpa goresan lapis lindung pada kondisi resistivitas semakin tinggi membutuhkan arus proteksi antara 0.00007-0.00011 mA.

#### **4.1.5.2 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Kadar Air Tanah 25% pada Hari ke 7**

Analisa data yang dilakukan dengan meneliti perbedaan arus proteksi dari masing-masing spesimen pada kondisi nilai resistivitas yang berbeda dengan kadar air 25%. Hasil yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata dari 3 kali pengulangan pengambilan data.





Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Kadar Air Tanah 25%

Pengukuran dilakukan untuk menganalisa adanya pengaruh arus proteksi terhadap lingkungan tanah dengan resistivitas berbeda dalam variasi kadar air yang berbeda untuk spesimen baja API 5L Grade B. Nilai arus proteksi tersebut didapat dari hasil pengukuran arus proteksi pada hari ke 7. Kemudian hasil tersebut diplot kedalam grafik yang akan digunakan untuk menganalisa kebutuhan arus proteksi terhadap kondisi resistivitas tanah yang berbeda dengan kadar air 25%.

Berdasarkan data yang telah disebutkan diatas, arus proteksi yang dibutuhkan pada spesimen tanpa *coating* yang terbesar terdapat pada lingkungan tanah dengan resistivitas 82.46 Ohm.m sebesar 0.043 mA dan terkecil pada resistivitas 123.69 Ohm.m dengan nilai 0.0247 mA, pada spesimen dengan luas cacat gores lapis lindung 500 mm<sup>2</sup> arus proteksi terbesar pada resistivitas 82.46 Ohm.m sebesar 0.026 mA dan terkecil pada resistivitas 123.69 Ohm.m sebesar 0.0053 mA. Sedangkan pada spesimen tanpa goresan lapis lindung arus proteksi terbesar pada resistivitas



82.46 Ohm.m dengan nilai 0.012 mA dan terkecil pada resistivitas 326.4 yaitu 0.002 mA.

Berdasarkan gambar 4.10 tersebut dapat dilihat bahwa kondisi spesimen tanpa diberi lapis lindung atau *coating* akan membutuhkan arus proteksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang diberi lapis lindung seluruhnya maupun spesimen yang diberi lapis lindung dengan luas cacat gores lapis lindung sebesar 500mm<sup>2</sup>. Arus proteksi yang dibutuhkan pada spesimen tanpa lapis lindung atau *coating* dalam keadaan resistivitas yang semakin tinggi antara 0.0247-0.043 mA. Kemudian pada spesimen dengan luas cacat gores lapis lindung sebesar 500 mm<sup>2</sup> dengan keadaan resistivitas tanh semakin tinggi membutuhkan arus proteksi sebesar 0.053-0.026 mA. Sedangkan pada spesimen tanpa goresan lapis lindung pada kondisi resistivitas semakin tinggi membutuhkan arus proteksi antara 0.002-0.012 mA.

#### 4.1.6 Hasil Foto Makro Spesimen

##### 4.1.6.1 Kadar Air Tanah 0%



Gambar 4. 11 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 1209.32 Ohm.m



Gambar 4. 12 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 1744.47 Ohm.m



Gambar 4. 13 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 2985.04 Ohm.m





Gambar 4. 14 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 6165.39 Ohm.m



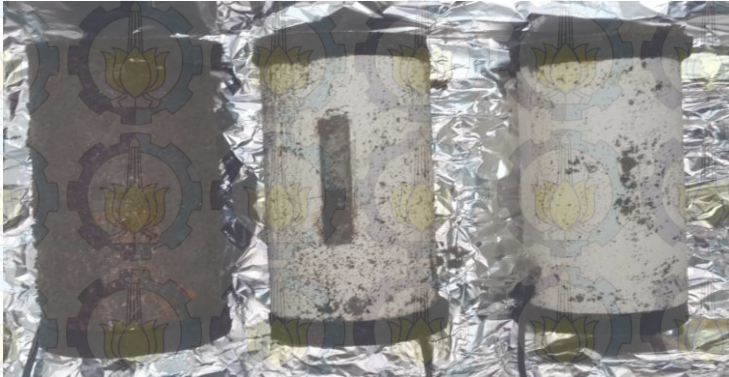
Gambar 4. 15 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 8040.91 Ohm.m





---

#### 4.1.6.2 Kadar Air Tanah 25%



Gambar 4. 16 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 82.46 Ohm.m



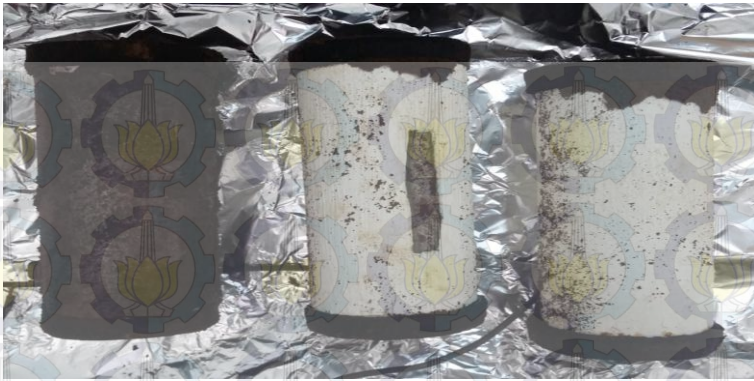
Gambar 4. 17 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 92.36 Ohm.m



Gambar 4. 18 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 97.81 Ohm.m



Gambar 4. 19 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 123.69 Ohm.m



Gambar 4. 20 Kondisi Spesimen dalam Media Tanah dengan Resistivitas 326.44 Ohm.m

#### 4.2 Pembahasan

Salah satu sistem yang sering dilakukan untuk menghambat laju korosi adalah sistem proteksi katodik arus paksa atau *impressed current cathodic protection* (ICCP). Sistem ini dilakukan dengan cara menurunkan nilai potensial struktur yang akan dilindungi yaitu spesimen atau katoda hingga berada pada level terproteksi dari nilai standar potensial proteksi dari elektroda *reference* tertentu. Sistem ini sering dikombinasikan dengan pemberian lapis lindung atau *coating* untuk melindungi struktur dengan baik pada lingkungan yang korosif.

Pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisa adanya pengaruh yang terjadi antara kondisi resistivitas tanah dan kadar air terhadap kebutuhan arus proteksi pada sistem ICCP. Spesimen yang digunakan adalah pipa API 5 L Grade B sebanyak 30 spesimen, 20 diantaranya dilapisi dengan lapis lindung dan 10 spesimen tidak diberi lapis lindung. Dari 20 spesimen yang diberi lapis lindung, 10 spesimen diberi cacat gores pada lapis lindung dengan luas goresan sebesar 500 mm<sup>2</sup>. Lapis lindung yang





diberika pada spesimen menggunakan dua jenis cat, pertama dengan cat primer *zinc chromate* dan lapisan kedua dengan *epoxy filler*. Tujuan dengan pemberian dua lapis lindung ini adalah untuk pencegah terhadap korosi sehingga spesimen terhindar dari kontaminan yang ada atau kontak antara permukaan pipa dengan lingkungan (tanah). Pemberian dengan dau lapis lindung sekaligus dapat mencegah adanya degradasi dari lapisan lain sehingga pori-pori pada permukaan benar-benar tertutup rapat selain cacat gores yang sengaja dibuat. Pemberian lapis lindung dan cacat gores pada spesimen diberikan secara teliti agar didapatkan hasil yang akurat dan goresan sengaja dibuat hanya pada permukaan spesimen. Semua spesimen yang akan diuji dimasukkan kedalam *countainer box* berisi tanah dengan variasi resistivitas dan variasi kadar air. Yang dimana variasi resistivitas tanah menggunakan tanah yang memiliki resistivitas berbeda yaitu tanah pasir warna abu-abu, tanah rawa, tanah pasir yang berwarna hitam pekat, tanah kapur, dan tanah humus. Sedangkan untuk variasi kadar air yaitu menggunakan kadar air 0% dan 25%. Setelah media tanah telah disiapkan, selanjutnya dilakukan pengukuran nilai resistivitas dengan menggunakan metode wenner.

Pengukuran nilai resistivitas tanah ini dengan menggunakan metode wenner dimana terdapat 4 titik pin. Arus listrik diinjeksikan kedalam lapisan tanah melalui dua elektroda arus. Akibat dari arus tersebut maka terjadi beda potensial di dalam tanah, beda potensial yang terjadi diukur oleh dua elektroda yang lain. Keempat elektroda tersebut disusun dengan jarak yang sama dalam satu garis. Nilai resistivitas ini diukur dengan perbedaan variasi kadar air dalam media tanah tersebut, kadar air yang digunakan adalah 0% (dalam keadaan kering) dan 25%. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan multitester





digital dan AC generator untuk memperoleh nilai arus dan potensial. Hasil arus dan potensial diperoleh dengan melakukan 3 kali pengulangan dan hasil yang diperoleh akan diambil nilai rata-rata, yang kemudian dimasukkan ke dalam rumus matematika untuk memperoleh nilai resistivitasnya. Karena nilai resistivitas yang diamati secara tidak langsung adalah nilai resistivitas semu, bukan nilai resistivitas sebenarnya.

Dari tabel 4.1 tersebut menunjukkan nilai resistivitas tanah yang berbeda, nilai resistivitas semakin menurun seiring dengan meningkatnya kadar air. Hal tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel yang lebih besar membuat ruang pori besar sehingga air cenderung mudah untuk berdifusi. Banyaknya air pada tanah akan memudahkan ionisasi elektrolit tanah terjadi perubahan komposisi udara dan air di dalam tanah sehingga menyebabkan rendahnya nilai resistivitas. Menurut Bai Wei (2013), mengatakan bahwa konduktivitas dan resistivitas secara signifikan dipengaruhi oleh kadar air. Sehingga dengan adanya perubahan kadar air dalam tanah yang dapat menyebabkan turunnya resistivitas. Hal tersebut dikarenakan air merupakan media pengantar listrik. Menurunnya nilai resistivitas tersebut akan menyebabkan tanah bersifat korosif, sehingga membutuhkan arus proteksi yang lebih tinggi.

Pengukuran arus proteksi spesimen dengan instalasi ICCP dilakukan selama 7 hari. Sebelum dilakukan pengukuran arus, dilakukan pengkondisian awal pada spesimen dengan dilakukan imersi selama 8 hari tanpa instalasi ICCP. Hal tersebut dilakukan untuk mencegah pembentukan lapisan pasif yang akan menurunkan proteksi dengan arus ICCP. Setelah pengkondisian awal tersebut dilakukan pengukuran potensial awal yang berfungsi untuk mengetahui nilai potensial sebelum dan sesudah instalasi ICCP yang selanjutnya akan dapat digunakan untuk



menentukan arus yang dibutuhkan masing-masing spesimen. Dengan diberikan perilaku yang sama antar spesimen, maka akan dapat dibandingkan kondisi awal dengan kondisi akhir dan untuk memastikan bahwa spesimen mengalami perlakuan yang sama di awal penelitian. Sesuai dengan standart pengujian NACE TM0169-2000 "*Laboratory Corrosion Testing of Metals*" pengukuran dilakukan setiap hari selama 7 hari dengan mengatur nilai potensial yang bekerja pada  $-850\text{ mV}$  dimana baja berada pada keadaan yang terproteksi. Metode pengukuran yang digunakan mengacu pada *half-cell* (potensial elektroda setengah sel) dengan elektroda acuan  $\text{Cu/CuSO}_4$ .

Dari hasil pengukuran potensial awal yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa nilai potensial awal akan semakin tinggi dengan bertambahnya luas goresan pada spesimen. Dan nilai potensial awal pada setiap spesimen akan semakin tinggi dengan nilai resistivitas yang semakin rendah dan kadar air yang semakin banyak.

Selanjutnya dilakukan pengukuran nilai arus proteksi. Pada pengukuran ini seringkali terjadi ketidakstabilan, terutama saat awal pengukuran yang disebabkan karena terjadinya overproteksi. Penyebab ketidakstabilan arus tersebut akibat dari lapisan pasif masih dalam proses pembentukan. Akan tetapi seiring berjalannya waktu tidak terjadi overproteksi sehingga arus menjadi cenderung stabil disebabkan terjadinya passivasi pada permukaan spesimen. Akan tetapi pada hari ke 4, kebutuhan arus mulai stabil dan mulai menunjukkan tren menurun. Penurunan arus proteksi disebabkan karena faktanya bahwa meski arus proteksi diterapkan, korosi masih saja terjadi dan menyebabkan pembentukan lapisan produk korosi dimana lapisan memiliki hambatan listrik yang tinggi yang dapat menahan aliran arus menembus lapisan.



Berdasarkan hasil pengukuran dengan media tanah yang memiliki nilai resistivitas dan kadar air yang sama, semakin besar goresan lapis lindung pada spesimen maka arus proteksi yang dibutuhkan akan semakin tinggi. Atau dapat dikatakan dengan bertambah besar luasan spesimen yang kontak langsung dengan lingkungan, maka akan semakin tinggi arus yang dibutuhkan untuk melindungi agar tetap berada pada level terproteksi. Hal tersebut dapat terjadi akibat adanya daerah pada permukaan logam yang terekspose langsung dengan lingkungannya. Sehingga dapat mengakibatkan terjadinya reaksi oksidasi yang berlanjut dengan adanya inisiasi korosi. Pasokan elektron yang semakin tinggi berguna untuk menghindari terjadinya korosi yang lebih parah. (J. Wu, 2009)

Pada hasil dari pengukuran arus proteksi dengan nilai resistivitas tanah yang semakin meningkat maka semakin rendah nilai arus proteksi yang dibutuhkan. Hal tersebut disebabkan karena saat transfer ion bereaksi dengan korosi pada tanah mengakibatkan resistivitas tanah yang tinggi, sehingga akan memperlambat reaksi korosi maka arus proteksi yang dibutuhkan rendah. Atau dengan kata lain nilai resistivitas tanah yang rendah akan menghasilkan tahanan sirkuit yang rendah pula, sehingga sel korosi mampu menghantarkan aliran arus korosi menjadi lebih mudah, akibatnya laju korosi dipercepat sehingga membutuhkan arus proteksi yang tinggi. Dengan kata lain resistivitas tanah yang tinggi menunjukkan bahwa tahanan total yang dihasilkan tinggi dengan demikian nilai tegangan dorong untuk mengatasi sel korosi juga tinggi, maka membutuhkan arus proteksi yang rendah. Dengan kata lain dapat diartikan bahwa resistivitas tanah yang tinggi bersifat isolator (sulit untuk menghantarkan arus), sedangkan untuk resistivitas tanah yang rendah bersifat konduktor (mudah menghantarkan listrik). Hal tersebut dikemukakan pada





tanah yang nilai resistivitas tinggi bertekstur lebih halus (tanah liat yang pada umumnya memiliki ukuran partikel  $>0.002$  mm) sehingga memiliki partikel yang lebih padat dan kapasitas pori untuk difusi air atau gas lebih sedikit dibandingkan tanah yang memiliki tekstur kasar (pasir yang pada umumnya memiliki ukuran partikel  $>2$  mm), sehingga dapat menghambat laju arus. Ruang pori pada tanah mengandung air atau gas. Kapasitas pori yang semakin besar (pasir) maka akan membutuhkan arus proteksi yang lebih besar pula karena lebih bersifat korosif.

Selain itu, pada tanah rawa yang pada umumnya memiliki kandungan ion klorida yang tinggi, menyebabkan resistivitas tanah yang rendah. Karena dengan adanya ion klorida akan bersifat merusak ketika bereaksi dengan larutan anodik logam. Sedangkan pada tanah kapur, umumnya mengandung *magnesium* dan *calcium*, aerta pada tanah humus mengandung elemen yang hampir sama dengan tanah kapur yaitu *calcium*, *magnesium* dan *potassium*. Dimana elemen tersebut akan membentuk oksida yang tidak larut. Endapan yang tidak larut tersebut akan menghasilkan lapisan protektif pada permukaan logam sehingga mengurangi aktivitas korosi. Sehingga nilai arus proteksi yang dibutuhkan rendah.

Sedangkan dengan meningkatnya jumlah kadar air, maka arus proteksi yang dibutuhkan akan meningkat pula. Hal tersebut dikarenakan banyaknya air pada tanah maka akan semakin mudah ionisasi elektrolit dalam tanah sehingga memudahkan aliran arus akibat aktivitas korosi dan kadar air dalam tanah berhubungan dengan konsentrasi oksigen dalam tanah. Kadungan oksigen pada tanah secara langsung berhubungan dengan ruang pori dan kandungan air. Pada tanah yang kering, kondisi menjadi aerob dan difusi oksigen menjadi lebih cepat. Perubahan kering ke basah atau anaerob ke aerob, akan meningkatkan laju korosi





daripada lingkungan tanah yang konstan. Konsentrasi oksigen meningkat dengan fluktuasi air dan udara, kapasitas pori yang besar maka akan memudahkan penetrasi air ke dalam tanah sehingga meningkatkan kelembaban tanah dan bersifat lebih korosif.

Dari hasil pengamatan makro spesimen, terlihat adanya peningkatan pola korosi pada kenaikan kadar air dalam media tanah. Dengan bertambahnya kadar air tersebut terlihat korosi yang semakin parah terjadi pada spesimen dengan luas goresan  $500 \text{ mm}^2$  dan  $18934.2 \text{ mm}^2$ . Terlihat pada kondisi media tanah dengan kadar air yang bertambah menyebabkan lapisan berwarna coklat kemerahan terbentuk dipermukaan spesimen dengan kondisi spesimen terdapat cacat gores lapis lindung. Semakin meningkat jumlah persen kadar air dan rendahnya nilai resistivitasnya, maka produk korosi yang timbul juga semakin bertambah banyak.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pengaruh dari resistivitas tanah yang semakin besar, akan menyebabkan kebutuhan arus proteksi yang semakin kecil, Hal tersebut dikarenakan resistivitas dengan nilai yang tinggi memiliki tahanan yang tinggi pula (atau bersifat isolator) sehingga arus proteksi yang dibutuhkan kecil.
2. Pengaruh kadar air yang semakin meningkat, maka kebutuhan arus proteksi akan semakin besar. Hal tersebut dikarenakan dengan bertambahnya jumlah kadar air dalam tanah akan mempermudah aliran arus karena air merupakan media penghantar listrik.

#### **5.2 Saran**

Dari penelitian yang telah dilakukan, penulis memiliki saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Dalam melakukan penelitian dapat menggunakan spesimen yang berbentuk pejal atau pelat, yang bertujuan untuk mengurangi kemungkinan masuknya air dari media tanah ke spesimen.
  2. Melakukan penelitian dengan menggunakan variabel lain seperti temperatur dan ukuran partikel tanah.
-



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*





## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_, SPLN 04-0225. (2000). **Peraturan Umum umtuk elektroda bumi dan penghantar bumi**, PT.PLN ( Persero )
- \_\_\_\_\_. (1983). *IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground Impedance and earth surface potential of grounding system*, IEEEstd 81.
- API Specification 5L. 2004. **STD API/PETRO Spec 5L-ENGL 2000-0732290 0618044970**. *Forty Third Edition*. USA: American Petroleum Institute.
- ASM Metal Handbook Vol.13 9<sup>th</sup> ed. 1987. **Corrosion**. Colorado: ASM International Handbook Committee.
- Bardal, Einar. 2003. **Corrosion and Protection**. Trondheim: Norway.
- Bard, Allen J., Faulkner, Larry R. 2000. *Electrochemical Methods : Fundamental and Appllications 2 Edition*. New York : John Wiley & Sons.Inc
- Callister, William. D. Jr,. 2006. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. *Seventh Edition*. USA: John Wiley & Sons Inc.
- Chamberlain, J.,Trethewey,KR. 1991. *Korosi*. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama
- Departemen Perindustrian dan Perdagangan. (\_\_\_\_). **Pendidikan dan Pelatihan Inspektur Korosi**. Jakarta: Balai Besar Bahan dan Barang Teknik.
-



- Fessler, Raymond R, Ph.D. 2008. ***Pipeline Corrosion***. USA: Michael Baker Jr., Inc.
- Fontana, Mars G. 1978. **Corrosion Engineering 2<sup>nd</sup> Edition**. Singapore: McGraw-Hill International.
- Jones, D.A. 1992. **Principles and Prevention of Corrosion**. New York: University of Nevada-Maximillan Publishing Company.
- Kenneth R., Trethewey, BSc., Ph.D, CChem., MRSC, MICorr.ST. 1991. ***CORROSION, for Students of Science and Engineering***. Alih bahasa Alex Tri Kantjono Widodo. PT. Gramedia Pustaka Utama: Jakarta
- M. H. Loke. 2000. ***Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies***. Malaysia : Universiti Sains Malaysia
- NACE Standard TM0169-95. 1995. ***Laboratory Corrosion Testing of Metals***. Houston: NACE International.
- Prameswari, Bunga. 2008. ***Studi Efektifitas Lapis Galvanis terhadap Ketahanan Korosi Pipa Baja ASTM A53 di Dalam Tanah (Underground Pipe)***. Depok : Universitas Indonesia
- Rhamdani, Deni. 2008. ***Analisis Resistensi Tanah Berdasarkan Pengaruh Kelembapan, Termapat, dan Kadar Garam***. Depok : Universitas Indonesia
- Roberge, Pierre, R., 2000. **Handbook of Corrosion Engineering**. USA: The Mc.Graw-Hill Companies Inc.



Santoso, Djoko.2002. **Pengantar Teknik Geofisika.**  
Bandung:ITB

Shreir, L.L. 1993. **Corrosion Vol.2 Corrosion control.** Great Britain: Butterworth-Heinemann

Sulistijono., **Diktat Korosi.** 1999. Surabaya: ITS

Walpole, Ronald E. 2011. *Probability Statistics for Engineering and Scientists.*

Wu, J. Xing, S. Yun, F. 2009. *The Influence of Coating Damage on The ICCP Effect.* Luoyang Ship Material Research Institute, P.R. China

Wei, Bai. 2013. *Effect of Physical properties on Electrical Conductivity of Compacted Lateritic Soil.* Jurnal terpublikasi : Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics. Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071. China



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**LAMPIRAN A**  
**HASIL PENGUKURAN ARUS PROTEKSI ICCP**

**1. Pada Kadar Air Tanah 0%**

**a. Resistivitas 1209.32 Ohm.m**

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.0002	0.0002	0.00018	0.00015	0.00013	0.0001	0.00009
	0.0002	0.0002	0.00017	0.00015	0.00012	0.0001	0.00009
	0.0002	0.0002	0.00017	0.00015	0.00012	0.0001	0.00009
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.000173</b>	<b>0.00015</b>	<b>0.000123</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.00009</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.0004	0.00031	0.00022	0.0002	0.00016	0.00015	0.00015
	0.0004	0.00032	0.00020	0.0002	0.00015	0.00015	0.00014
	0.0004	0.00030	0.00021	0.0002	0.00017	0.00015	0.00014
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.00031</b>	<b>0.00021</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.00016</b>	<b>0.00015</b>	<b>0.000143</b>
Tanpa Coating	0.0054	0.0046	0.0038	0.0030	0.0023	0.0020	0.0020
	0.0050	0.0046	0.0037	0.0031	0.0023	0.0019	0.0020
	0.0052	0.0046	0.0039	0.0029	0.0023	0.0021	0.0020
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0052</b>	<b>0.0046</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.003</b>	<b>0.0023</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0020</b>

**b. Resistivitas 1744.47 Ohm.m**

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.00020	0.00020	0.00017	0.00017	0.00016	0.00014	0.00011
	0.00020	0.00020	0.00018	0.00017	0.00015	0.00013	0.00011
	0.00020	0.00019	0.00018	0.00017	0.00016	0.00013	0.00010
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00020</b>	<b>0.000197</b>	<b>0.000177</b>	<b>0.00017</b>	<b>0.000157</b>	<b>0.000133</b>	<b>0.000107</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.00050	0.00045	0.00040	0.00032	0.00030	0.00025	0.00020
	0.00050	0.00046	0.00040	0.00030	0.00029	0.00025	0.00020
	0.00050	0.00045	0.00040	0.00030	0.00027	0.00024	0.00020
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00050</b>	<b>0.00045</b>	<b>0.00040</b>	<b>0.000307</b>	<b>0.000287</b>	<b>0.000247</b>	<b>0.00020</b>
Tanpa Coating	0.0065	0.0051	0.0049	0.0036	0.0027	0.0022	0.0020
	0.0065	0.0051	0.0048	0.0037	0.0025	0.0022	0.0019
	0.0065	0.0050	0.0048	0.0037	0.0023	0.0020	0.0019
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0065</b>	<b>0.00507</b>	<b>0.00483</b>	<b>0.00367</b>	<b>0.0025</b>	<b>0.00213</b>	<b>0.00193</b>

c. Resistivitas 2985.04 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.00022	0.00012	0.00010	0.000097	0.000090	0.000080	0.000070
	0.00022	0.00012	0.00010	0.000098	0.000087	0.000081	0.000070
	0.00022	0.00012	0.00010	0.000096	0.000093	0.000079	0.000070
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00022</b>	<b>0.00012</b>	<b>0.00010</b>	<b>0.000097</b>	<b>0.000090</b>	<b>0.000080</b>	<b>0.000070</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.000435	0.00035	0.00030	0.00024	0.00017	0.00014	0.00011
	0.000435	0.00037	0.00028	0.00022	0.00018	0.00014	0.00010
	0.000435	0.00033	0.00032	0.00025	0.00016	0.00013	0.00010
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.000435</b>	<b>0.00035</b>	<b>0.00030</b>	<b>0.000237</b>	<b>0.00017</b>	<b>0.000137</b>	<b>0.000103</b>
Tanpa Coating	0.0056	0.0045	0.0041	0.0034	0.0025	0.0018	0.0012
	0.0056	0.0045	0.0040	0.0036	0.0025	0.0018	0.0011
	0.0056	0.0045	0.0041	0.0034	0.0026	0.0018	0.0013
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0056</b>	<b>0.0045</b>	<b>0.0041</b>	<b>0.0035</b>	<b>0.00253</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0012</b>



d. Resistivitas 6165.39 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.00020	0.00015	0.00013	0.00010	0.00011	0.00011	0.00010
	0.00020	0.00015	0.00013	0.00012	0.00011	0.00010	0.00010
	0.00018	0.00015	0.00014	0.00010	0.00010	0.00010	0.00010
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.000193</b>	<b>0.00015</b>	<b>0.00013</b>	<b>0.00011</b>	<b>0.000107</b>	<b>0.000103</b>	<b>0.00010</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.00040	0.00035	0.00030	0.00024	0.00020	0.00020	0.00020
	0.00040	0.00035	0.00030	0.00024	0.00020	0.00020	0.00020
	0.00040	0.00038	0.00029	0.00024	0.00020	0.00019	0.00020
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00040</b>	<b>0.00036</b>	<b>0.000297</b>	<b>0.00024</b>	<b>0.00020</b>	<b>0.00020</b>	<b>0.00020</b>
Tanpa Coating	0.0061	0.0054	0.0042	0.0035	0.0028	0.0017	0.0013
	0.0063	0.0054	0.0042	0.0035	0.0028	0.0017	0.0010
	0.0064	0.0053	0.0040	0.0033	0.0028	0.0015	0.0011
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00627</b>	<b>0.00537</b>	<b>0.00413</b>	<b>0.00337</b>	<b>0.0028</b>	<b>0.0016</b>	<b>0.00113</b>



e. Resistivitas 8040.91 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.00020	0.00020	0.00018	0.00020	0.00011	0.00010	0.00010
	0.00020	0.00019	0.00018	0.00017	0.00013	0.00010	0.00010
	0.00020	0.00019	0.00018	0.00016	0.00011	0.00010	0.00010
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00020</b>	<b>0.000193</b>	<b>0.00018</b>	<b>0.000177</b>	<b>0.000117</b>	<b>0.00010</b>	<b>0.00010</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.00040	0.00030	0.00023	0.00025	0.00020	0.00020	0.00020
	0.00040	0.00030	0.00023	0.00025	0.00020	0.00020	0.00020
	0.00040	0.00030	0.00023	0.00025	0.00020	0.00020	0.00020
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.00040</b>	<b>0.00030</b>	<b>0.00023</b>	<b>0.00025</b>	<b>0.00020</b>	<b>0.00020</b>	<b>0.00020</b>
Tanpa Coating	0.006	0.0047	0.0032	0.0030	0.0024	0.0019	0.0010
	0.006	0.0047	0.0032	0.0030	0.0025	0.0019	0.0009
	0.006	0.0047	0.0032	0.0030	0.0024	0.0017	0.0009
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.006</b>	<b>0.0047</b>	<b>0.0032</b>	<b>0.0030</b>	<b>0.00243</b>	<b>0.00183</b>	<b>0.00093</b>

## 2. Kadar Air Tanah 25%

### a. Resistivitas 82.46 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.004	0.04	0.03	0.03	0.018	0.015	0.012
	0.004	0.003	0.03	0.02	0.018	0.015	0.012
	0.005	0.03	0.02	0.02	0.016	0.015	0.012
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0043</b>	<b>0.033</b>	<b>0.027</b>	<b>0.023</b>	<b>0.0173</b>	<b>0.015</b>	<b>0.012</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.05	0.04	0.03	0.02	0.028	0.029	0.026
	0.03	0.04	0.03	0.03	0.027	0.028	0.025
	0.04	0.03	0.03	0.03	0.028	0.027	0.026
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.04</b>	<b>0.037</b>	<b>0.03</b>	<b>0.027</b>	<b>0.0277</b>	<b>0.0273</b>	<b>0.0257</b>
Tanpa Coating	0.14	0.13	0.10	0.09	0.07	0.06	0.05
	0.13	0.13	0.11	0.09	0.06	0.05	0.04
	0.13	0.12	0.10	0.08	0.06	0.06	0.04
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.13</b>	<b>0.127</b>	<b>0.103</b>	<b>0.087</b>	<b>0.063</b>	<b>0.057</b>	<b>0.043</b>

**b. Resistivitas 92.36 Ohm.m**

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.02	0.016	0.015	0.013	0.011	0.010	0.009
	0.02	0.016	0.015	0.013	0.011	0.010	0.009
	0.02	0.016	0.015	0.013	0.010	0.010	0.009
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0167</b>	<b>0.016</b>	<b>0.015</b>	<b>0.013</b>	<b>0.011</b>	<b>0.010</b>	<b>0.009</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.11	0.05	0.038	0.037	0.033	0.031	0.025
	0.10	0.06	0.039	0.037	0.033	0.029	0.026
	0.10	0.05	0.038	0.037	0.033	0.029	0.024
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.103</b>	<b>0.053</b>	<b>0.038</b>	<b>0.037</b>	<b>0.033</b>	<b>0.0293</b>	<b>0.025</b>
Tanpa Coating	0.13	0.12	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
	0.13	0.11	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03
	0.12	0.12	0.06	0.06	0.05	0.03	0.03
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.127</b>	<b>0.117</b>	<b>0.063</b>	<b>0.057</b>	<b>0.047</b>	<b>0.037</b>	<b>0.03</b>



c. Resistivitas 97.81 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.011	0.008	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
	0.011	0.008	0.005	0.005	0.005	0.004	0.003
	0.011	0.007	0.008	0.006	0.004	0.003	0.002
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.011</b>	<b>0.0077</b>	<b>0.0067</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.0043</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.003</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.014	0.014	0.013	0.01	0.01	0.007	0.006
	0.014	0.013	0.013	0.01	0.009	0.006	0.006
	0.014	0.013	0.013	0.01	0.009	0.005	0.006
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.014</b>	<b>0.013</b>	<b>0.013</b>	<b>0.01</b>	<b>0.0093</b>	<b>0.006</b>	<b>0.006</b>
Tanpa Coating	0.042	0.039	0.036	0.031	0.028	0.027	0.026
	0.040	0.038	0.034	0.031	0.028	0.026	0.025
	0.040	0.038	0.034	0.031	0.026	0.026	0.025
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.041</b>	<b>0.038</b>	<b>0.035</b>	<b>0.031</b>	<b>0.0273</b>	<b>0.0263</b>	<b>0.0253</b>



d. Resistivitas 123.69 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.005	0.0045	0.0034	0.0029	0.0024	0.0023	0.0020
	0.004	0.0043	0.0034	0.0028	0.0025	0.0022	0.0022
	0.005	0.0045	0.0034	0.0028	0.0024	0.0022	0.0021
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0047</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.0034</b>	<b>0.0028</b>	<b>0.00243</b>	<b>0.0022</b>	<b>0.0021</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.011	0.010	0.009	0.009	0.007	0.007	0.006
	0.012	0.011	0.009	0.008	0.007	0.007	0.005
	0.012	0.010	0.009	0.009	0.007	0.006	0.005
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0117</b>	<b>0.0103</b>	<b>0.009</b>	<b>0.0087</b>	<b>0.007</b>	<b>0.0067</b>	<b>0.0053</b>
Tanpa Coating	0.051	0.046	0.041	0.036	0.032	0.030	0.026
	0.053	0.047	0.040	0.033	0.030	0.028	0.024
	0.050	0.046	0.039	0.034	0.029	0.028	0.024
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.0513</b>	<b>0.463</b>	<b>0.040</b>	<b>0.0343</b>	<b>0.0303</b>	<b>0.0287</b>	<b>0.0247</b>

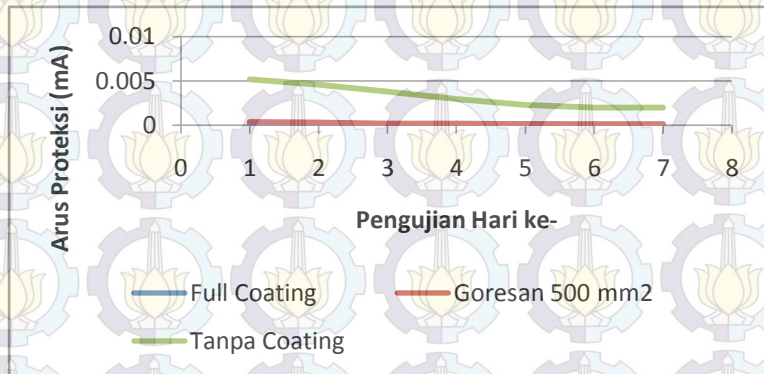
e. Resistivitas 326.44 Ohm.m

Luas Goresan	Arus Proteksi (mA) Pengujian Hari ke-						
	1	2	3	4	5	6	7
Tanpa Goresan	0.015	0.014	0.007	0.007	0.006	0.006	0.002
	0.014	0.013	0.006	0.006	0.006	0.006	0.002
	0.013	0.013	0.007	0.006	0.007	0.005	0.002
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.014</b>	<b>0.0133</b>	<b>0.0067</b>	<b>0.0063</b>	<b>0.0063</b>	<b>0.0057</b>	<b>0.002</b>
500 mm <sup>2</sup>	0.03	0.003	0.02	0.03	0.02	0.009	0.008
	0.03	0.002	0.02	0.01	0.01	0.008	0.007
	0.03	0.003	0.02	0.02	0.02	0.009	0.005
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.03</b>	<b>0.027</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>	<b>0.017</b>	<b>0.0087</b>	<b>0.0067</b>
Tanpa Coating	0.1	0.11	0.08	0.05	0.03	0.029	0.025
	0.1	0.1	0.07	0.06	0.03	0.028	0.026
	0.09	0.09	0.08	0.05	0.03	0.029	0.026
<b>Rata-Rata</b>	<b>0.097</b>	<b>0.1</b>	<b>0.077</b>	<b>0.053</b>	<b>0.03</b>	<b>0.029</b>	<b>0.026</b>

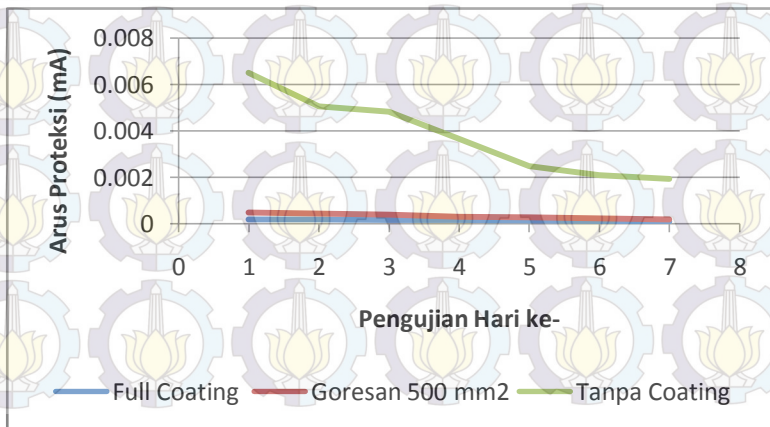
## LAMPIRAN B

### GRAFIK ARUS PROTEKSI PADA MASING-MASING SPESIMEN

#### 1. Kadar Air Tanah 0%

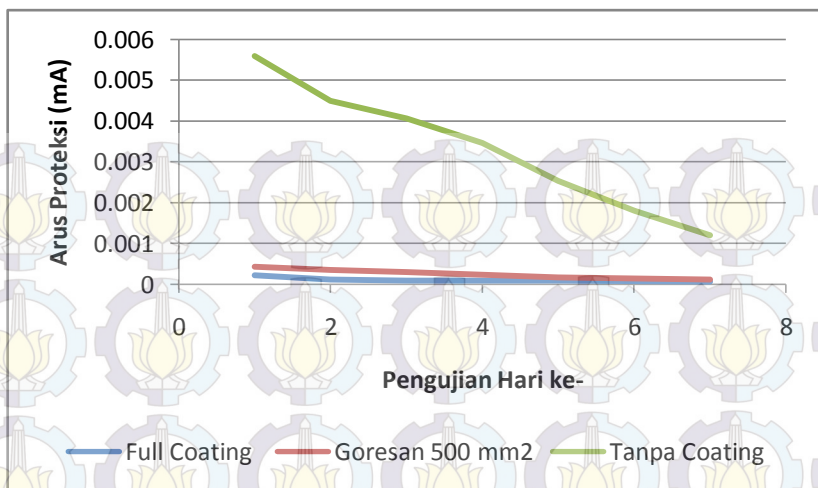


Gambar 1. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 1209.32 Ohm.m Selama 7 Hari

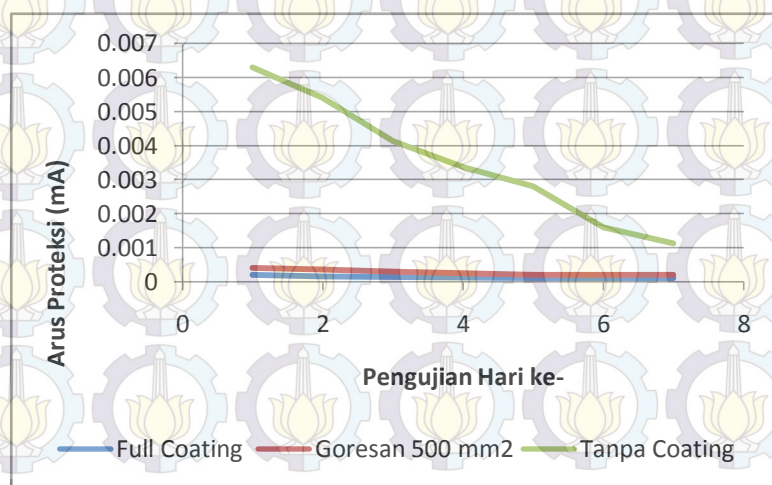


Gambar 2. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 1744.47 Ohm.m Selama 7 Hari



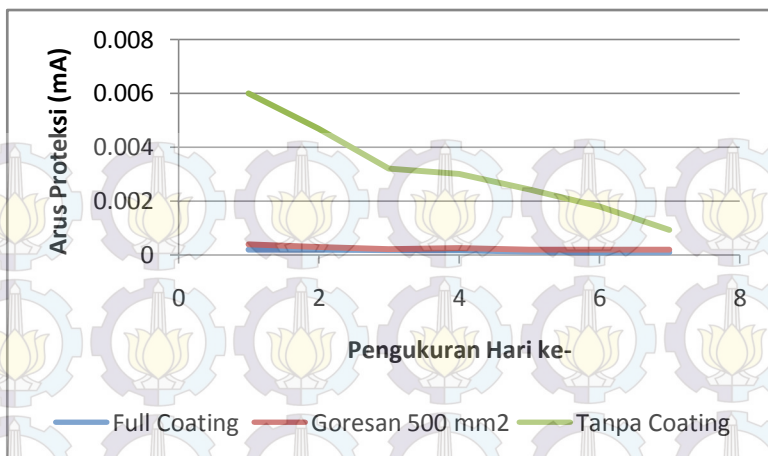


Gambar 3. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 2985.04 Ohm.m Selama 7 Hari



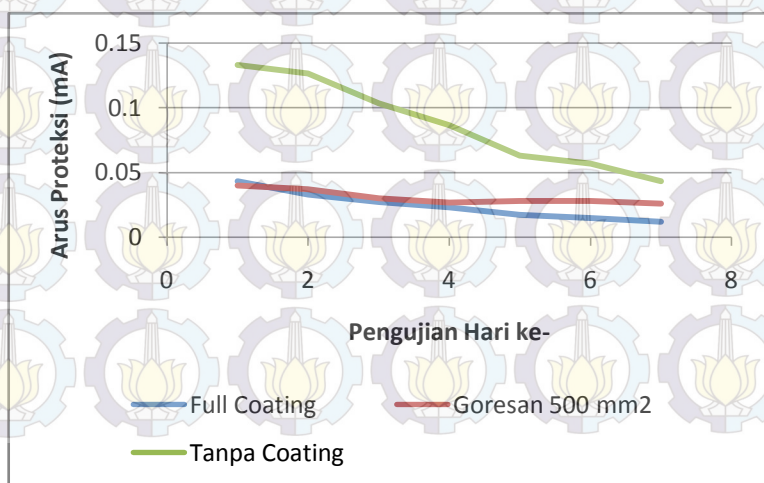
Gambar 4. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 6165.39 Ohm.m Selama 7 Hari



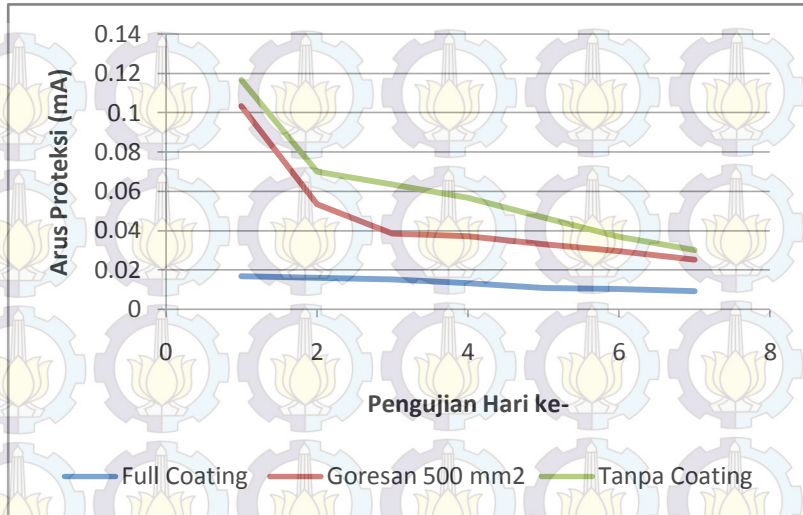


Gambar 5. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 8040.91 Ohm.m Selama 7 Hari

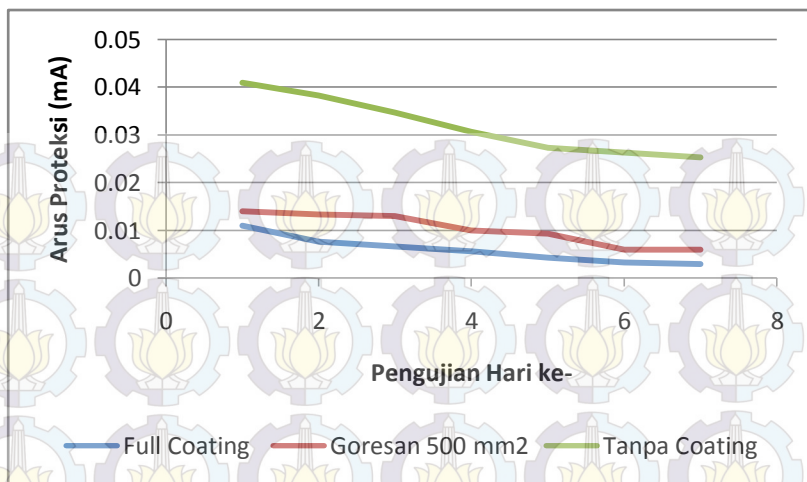
## 2. Kadar Air Tanah 25%



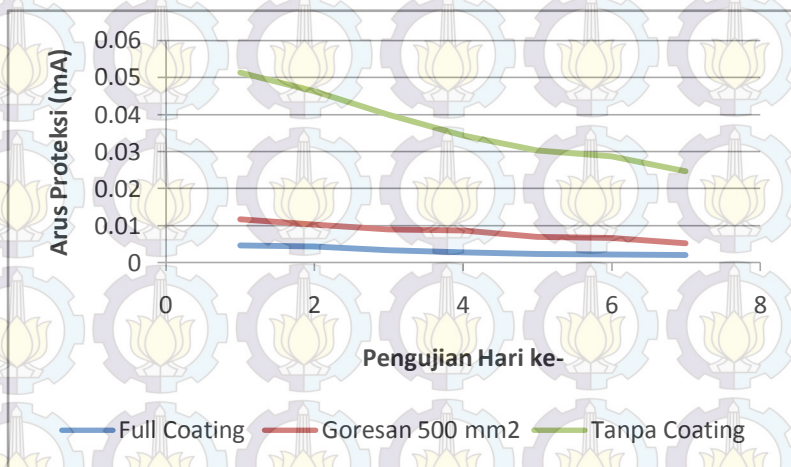
Gambar 6. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 82.46 Ohm.m Selama 7 Hari



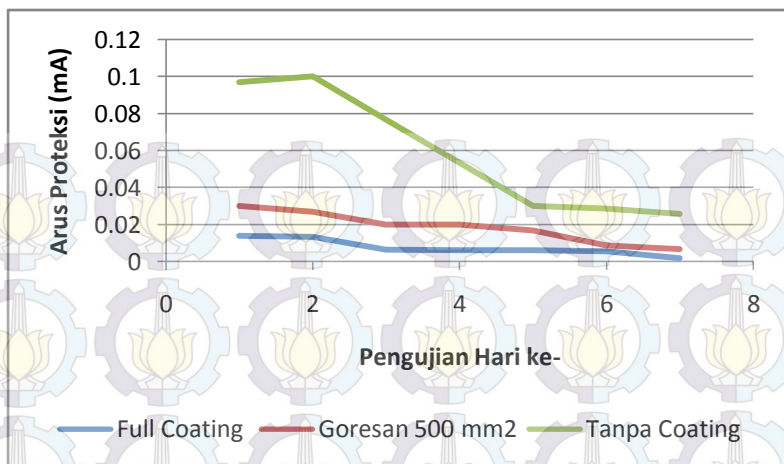
Gambar 7. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 92.36 Ohm.m Selama 7 Hari



Gambar 8. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 97.81 Ohm.m Selama 7 Hari

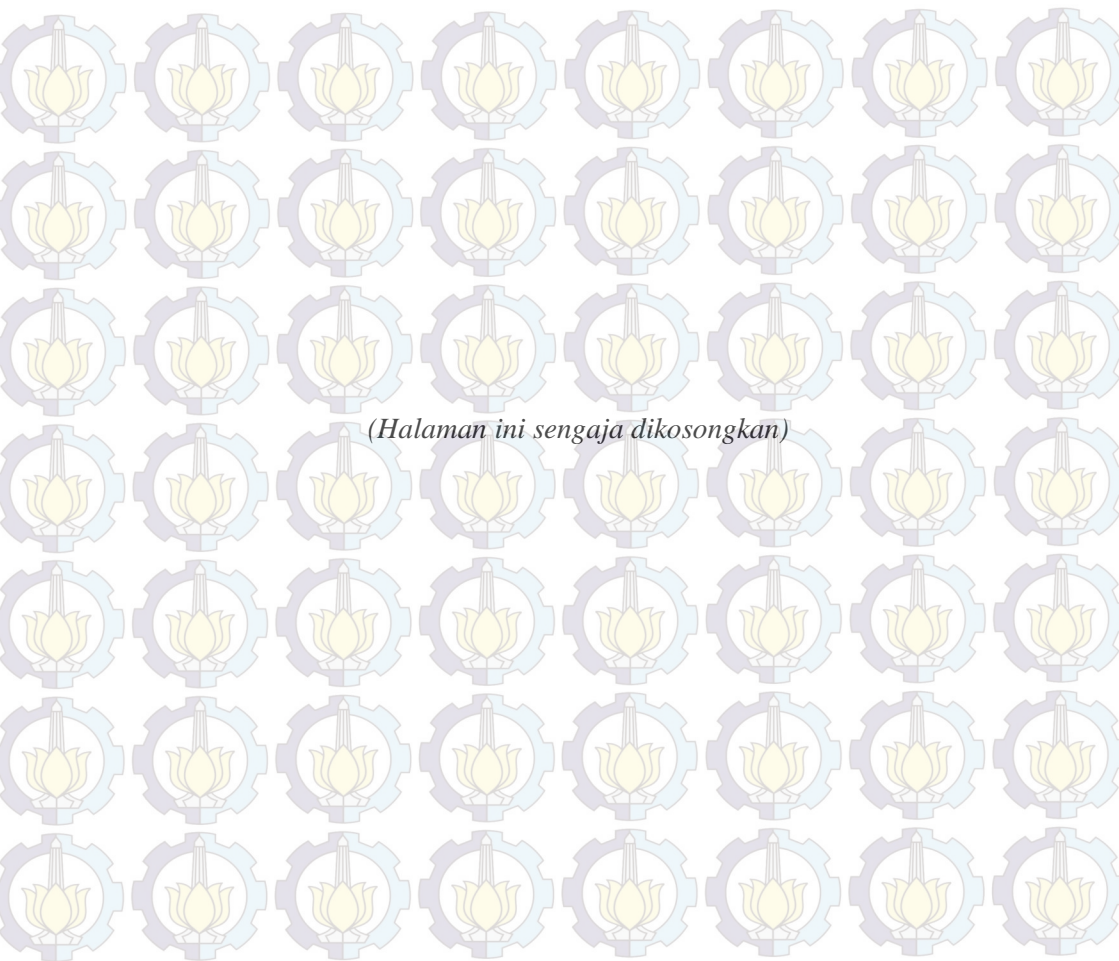


Gambar 9. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 123.69 Ohm.m Selama 7 Hari



Gambar 10. Grafik Arus Proteksi dalam Media Tanah dengan Resistivitas 326.44 Ohm.m Selama 7 Hari





*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN C

### PERHITUNGAN RESISTIVITAS MEDIA TANAH

#### 1. Perhitungan Volume Larutan

- Luas Permukaan Katoda

$$SA = \pi \cdot OD \cdot L$$

$$SA = 3.14 \times 60.3 \times 100$$

$$SA = 18934.2 \text{ mm}^2$$

$$SA = 189.342 \text{ cm}^2$$

Berdasarkan NACE Standart TM 0169-95, rasio minimum yang dianjurkan untuk volume larutan elektrolit terhadap luas permukaan spesimen adalah  $20 \text{ ml/cm}^2$ .

- Volume tanah minimum untuk 1 spesimen

$$V_{\text{elektrolit}} = 20 \text{ ml/cm}^2 \times 189.342 \text{ cm}^2$$

$$= 3786.84 \text{ mL}$$

$$= \pm 3.8 \text{ L (dibuat 4L)}$$

- Volume tanah minimum untuk 3 spesimen (1 elektrolit)

$$V_{\text{elektrolit}} = 3 \times 4 \text{ L}$$

$$= 12 \text{ L}$$

Dalam percobaan ini, volume elektrolit yang digunakan sebesar  $\pm 2$  liter untuk setiap spesimen. Sehingga untuk satu box yang berisi 3 spesimen, dibutuhkan volume elektrolit sebanyak:

$$V = 3 \times 2 \text{ L} = 6 \text{ L}$$

#### 2. Perhitungan Air yang dibutuhkan

Air yang diberikan pada percobaan ini untuk memberikan beda kelembaban sebesar 0% dan 25%.

##### 1. Kadar Air 0%

Media tanah yang digunakan dalam percobaan ini dikeringkan dibawah sinar matahari hingga kering dan tidak ditambahkan air.

## 2. Kadar Air 25%

Media tanah yang digunakan dalam percobaan ini ditambahkan air suling sebanyak 25% dari volumenya.

### ♦ Perhitungan Penambahan Kadar Air Sebanyak 25% Pada Media Tanah Setiap Spesimen

$$\text{Panjang} = 31 \text{ cm}$$

$$\text{Lebar} = 9.5 \text{ cm}$$

$$\text{Tinggi} = 8 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{media tanah}} &= 31 \times 9.5 \times 8 \\ &= 2356 \text{ cm}^3 \\ &= 2.356 \text{ L} \end{aligned}$$

Tambahan kadar air untuk setiap spesimen

$$\begin{aligned} V_{\text{tambahan air}} &= 2.356 \times 25\% \\ &= 0.589 \text{ L} \\ &= 589 \text{ mL (Dibuat 600 mL)} \end{aligned}$$

## 3. Perhitungan Nilai Resistivitas Tanah

Nilai resistivitas tanah diperoleh dengan menggunakan metode wenner dalam pengukurannya. Dimana terdapat 4 titik pin dalam satu garis dengan jarak yang sama yaitu 9 cm. Pada dua pin terluar akan diketahui nilai arus dan pada dua pin ditengah akan diketahui nilai potensial. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan dan diambil nilai rata-rata. Kemudian akan dihitung dengan menggunakan rumus pada persamaan 3.1.



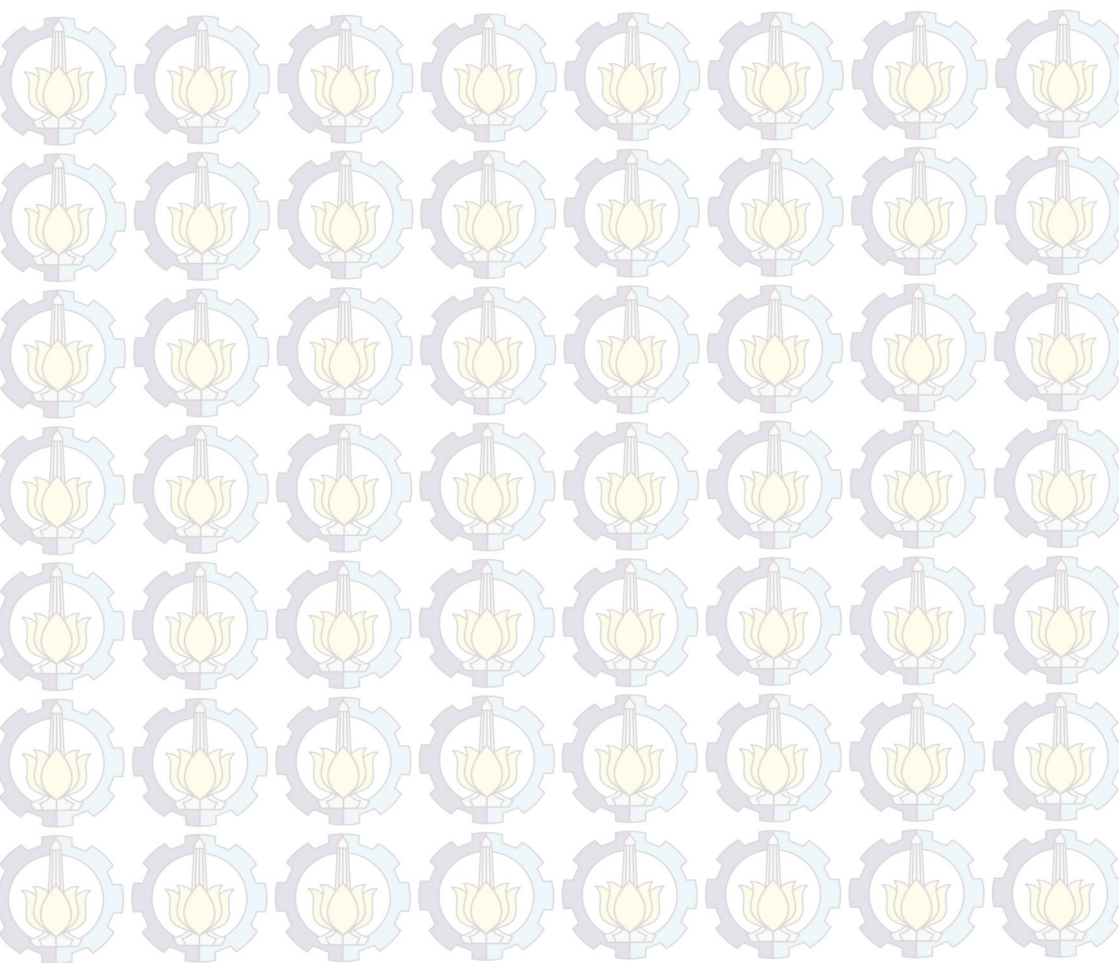
◆ Kadar Air Tanah 0%

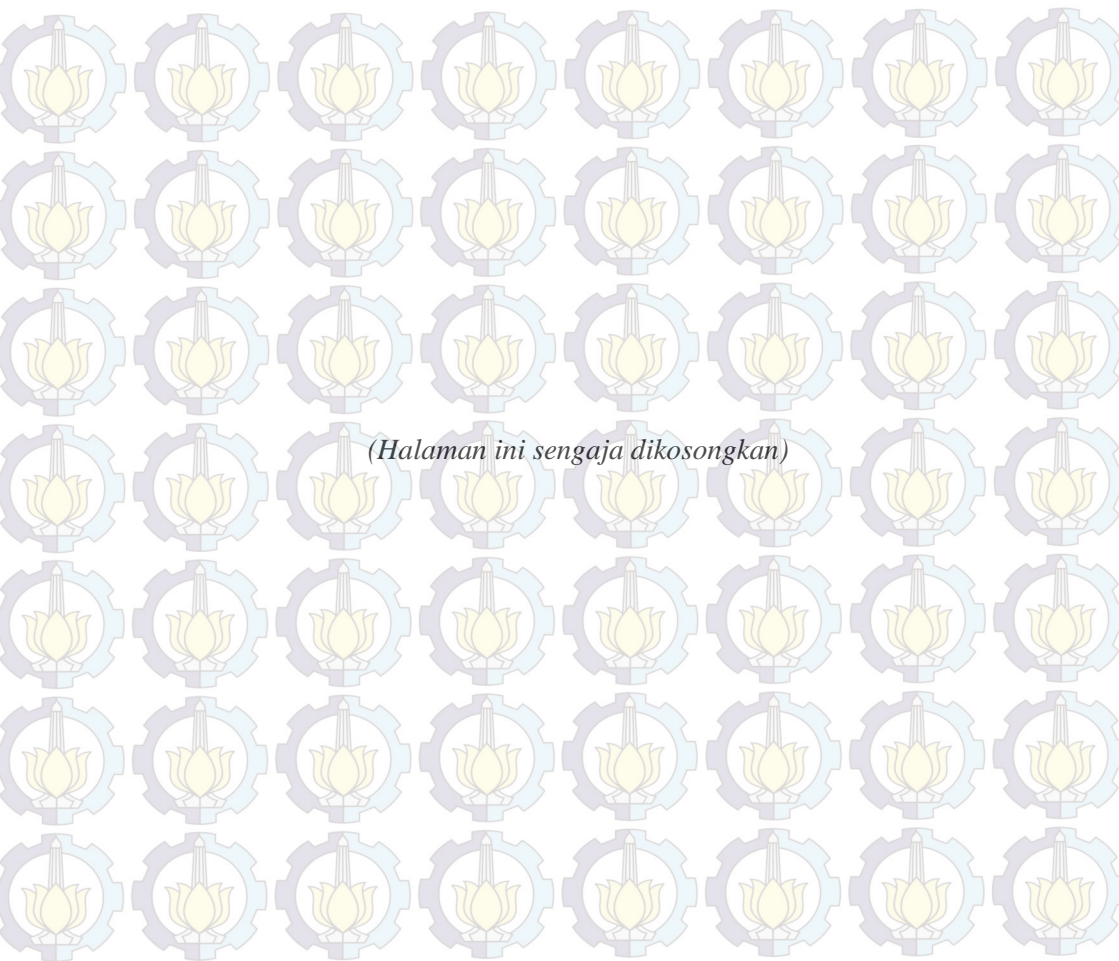
Jenis Tanah	I (mA)	V (mV)	Perhitungan	Resistivitas (Ohm.m)
Tanah Pasir (Warna Abu-abu)	0.37	791.667	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (791.667/0.37)$	1209.324
Tanah Rawa	0.34	1049.4	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (1049.4/0.34)$	1744.47
Tanah Pasir (Warna Hitam)	0.02	1531.6	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (1531.6/0.02)$	2985.93
Tanah Kapur	0.02	218.17	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (218.17/0.02)$	6165.39
Tanah Humus	0.12	1707.2	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (1707.2/0.12)$	8040.91

◆ Kadar Air Tanah 25%

Jenis Tanah	I (mA)	V (mV)	Perhitungan	Resistivitas (Ohm.m)
Tanah Pasir (Warna Abu-abu)	6.01	876.67	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (876.67/6.01)$	82.45
Tanah Rawa	8.31	1358.5	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (1358.5/8.31)$	92.35
Tanah Pasir (Warna Hitam)	10.29	1780.556	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (1780.556/10.29)$	97.81
Tanah Kapur	6.735	1474	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (876.67/6.01)$	123.69
Tanah Humus	1.41	815	$\rho = 2 \times 3.14 \times 9 \times (815/1.41)$	326.43





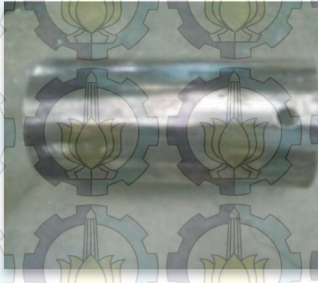


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

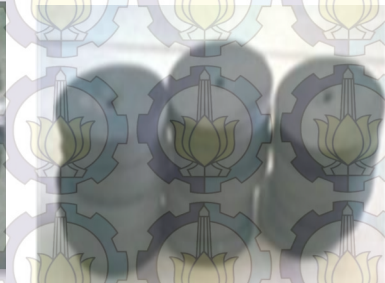
## LAMPIRAN D

### FOTO BAHAN DAN ALAT PENELITIAN

#### • Bahan Penelitian



(1)



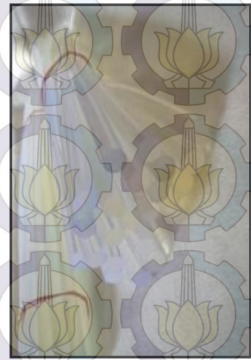
(2)



(3)



(4)



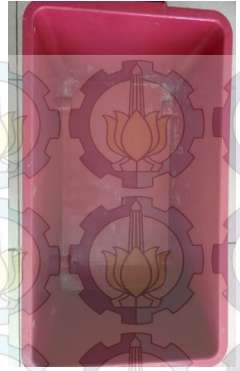
(5)

Gambar 11. Bahan Penelitian (1) Pipa API 5L *Grade B*, (2) Anoda Grafit, (3) *Epoxy Coating*, (5) Cat *Zinc Chromate*, (6) Filler Perekat (Lem Tembak)

- **Alat Penelitian**



(1)



(2)

(3)

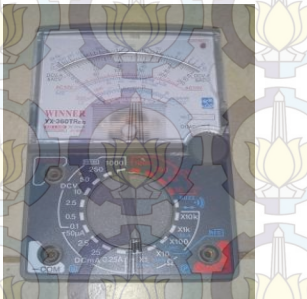




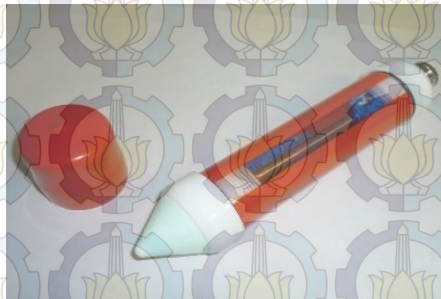
(4)



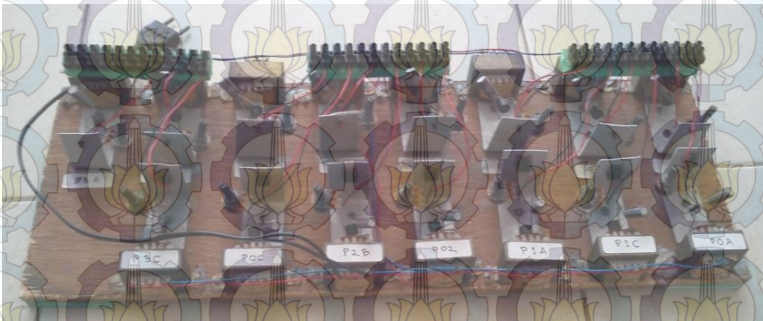
(5)



(6)



(7)



(8)



(9)

Gambar 12. Alat Penelitian (1) Mesin Pemotong, (2) Mesin Bor, (3) *Countainer Box* Plastik, (4) Kaca Bening untuk Sekat, (5) Multitester Digital, (6) Avometer, (7) Elektroda Cu/CuSO<sub>4</sub>, (8) Rectifier, (9) Mur dan Baut



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Arini Santoso, dilahirkan di Mojokerto pada tanggal 23 April 1993. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TKK Wijana Sejati Kota Mojokerto, SD Katolik Wijana Sejati Kota Mojokerto, SMPN 9 Mojokerto dan SMAN 3 Kota Mojokerto. Setelah lulus pada tingkat SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan menuju ke perguruan tinggi dan diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2011 yang terdaftar dengan NRP 2711100029. Selama menjalani perkuliahan penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS dalam Badan Semi Otonom Minat Bakat sebagai staff (2012-2013), UKM Bola Basket ITS dengan jabatan sekretaris (2012-2013) dan wakil ketua (2013-2014). Serta penulis juga pernah menjadi Asisten Laboratorium Korosi dan Pengendalian Korosi pada tahun 2014. Penulis pernah melaksanakan Kerja Pratik di Badak NGL, Bontang selama satu setengah bulan. Penulis memilih bidang korosi dan analisa kegagalan sebagai bidang tugas akhir untuk memperoleh gelar sarjana teknik.

Email : [arinisantoso230493@gmail.com](mailto:arinisantoso230493@gmail.com)



